



TUGAS AKHIR - MO141326

**STUDI ANALITIS, NUMERIS DAN  
EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN DINAMIKA  
TEGANGAN TALI TAMBAT SPAR DENGAN  
VARIASI *HEADING* GELOMBANG**

IVANDITO HERDAYANDITYA

NRP. 4313 100 025

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Murdjito, M.Sc., Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 60111

2017



FINAL PROJECT - MO141326

# ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SPAR MOTION AND MOORING TENSION DYNAMIC WITH WAVE HEADING VARIATION

IVANDITO HERDAYANDITYA

NRP. 4313 100 025

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Murdjito, M.Sc., Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA 60111

2017

**Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen Olah Gerak dan  
Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR dengan Variasi  
Heading Gelombang**

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Ivandito Herdayanditya**

NRP. 4313 100 025

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. .... (Pembimbing 1)
2. Murdjito, M.Sc., Eng. .... (Pembimbing 2)
3. Dr. Eng Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. .... (Penguji 1)
4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. .... (Penguji2)
5. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. .... (Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2017

# **Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR dengan Variasi Heading Gelombang**

Nama : Ivandito Herdayanditya  
NRP : 4313 100 025  
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.  
Murdjito, M.Sc., Eng.

## **ABSTRAK**

Tugas Akhir ini membahas olah gerak bangunan SPAR dalam kondisi terapung bebas dan tertambat serta tegangan tali tambat SPAR. Tali tambat berjumlah 4 buah dan dalam konfigurasi taut. Olah gerak dan tegangan tali SPAR dianalisa dengan metode analitis, numeris dan eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dalam *frequency domain*. Olah gerak dan dinamika tegangan akan ditinjau terhadap 3 arah gelombang datang yang berbeda ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ). Besaran yang dibandingkan adalah RAO (*Response Amplitude Operator*) SPAR dengan kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat, baik untuk gerak bangunan maupun tegangan tali tambat. Penelitian ini menunjukkan arah gelombang mempengaruhi besar gerak dan tegangan tali. Gerak bangunan dalam mode *surge* dan *pitch* dari SPAR yang tertinggi terjadi pada arah gelombang  $0^\circ$ . *Surge* sebesar 5.053 m/m dan *pitch* sebesar 7.344 deg/m pada kondisi tertambat. Sedangkan, gerakan *heave* menunjukkan bentuk yang sama dari 3 arah gelombang tersebut (0.091 m/m, kondisi tertambat). Tegangan dari tali akan membesar jika arah datang gelombang sejajar dengan tali tersebut, dengan nilai terbesar 399.160 ton/m.

**Keywords:** RAO, Taut Mooring System, SPAR, heading gelombang

# **Analytical, Numerical and Experimental Study of SPAR Motion and Mooring Tension Dynamic with Wave Heading Variation**

Name : Ivandito Herdayanditya  
NRP : 4313 100 025  
Department : Ocean Engineering, FTK – ITS  
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.  
Murdjito, M.Sc., Eng.

## **ABSTRACT**

This final project investigates motion of a SPAR, both in free floating and moored condition, and its mooring tension dynamic. The SPAR is moored to 4 mooring lines in taut configuration. Motion and mooring dynamic are studied in analytical, numerical and experimental method. Experiment is conducted in Hydrodynamics Laboratory of FTK ITS in frequency domain to verify analytical and numerical analysis. Numerical method is calculated using a hydrodynamic computation software (MOSES). It is found that MOSES shows similar result with analytical and experiment method both motions and mooring tensions of SPAR. Parametric study is then conducted for motions and mooring tension dynamics in 3 wave headings ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  and  $45^\circ$ ) using numerical method. Compared to free floating condition, heave motion of moored SPAR decreases significantly. This study also shows that motion and mooring tension dynamic of moored SPAR are effected by wave headings. In moored condition, surge RAO is 5.053 m/m and pitch RAO is 7.344 deg/m, yet there is no significant change of heave motion (0.091 m/m). It also can be seen that there is no natural frequency shifting among 3 particular wave headings. Each mooring lines shows different behavior among the others for three particular wave headings that tension increases in lines which are parallel to wave propagation with highest tension is 399.160 ton/m.

**Keywords:** RAO, Taut Mooring System, SPAR, wave heading

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.

Tugas Akhir ini berjudul “*Studi Analitis, Numeris, dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR dengan Variasi Heading Gelombang*”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini secara khusus akan membahas olah gerak dari struktur SPAR yang dianalisa secara analitis, numeris dan juga eksperimen serta tegangan tali tambat SPAR. Adanya Tugas Akhir ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca mengenai perilaku gerak SPAR beserta tegangan tali tambatnya.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran guna meningkatkan kemampuan menyusun laporan yang lebih baik lagi ke depannya. Penulis juga berharap semoga Tugas Akhir ini bisa bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 2017

Ivandito H.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian pengerjaan Tugas Akhir dan penulisan laporan ini karena bimbingan, dukungan, serta kebaikan dari seluruh pihak yang ikut andil dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Tanpa bimbingan dan dukungan pihak-pihak tersebut, penulis hampir dipastikan akan mengalami banyak sekali hambatan dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang selalu mendukung baik berupa doa, motivasi dan segala dukungan lainnya.
2. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D dan Murdjito, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi selama kuliah di Teknik Kelautan.
3. Ir. Imam Rochani, M.Sc. selaku dosen wali penulis yang selalu membimbing dalam kehidupan perkuliahan.
4. Bapak Condro, Mas Rudi dan Mas Hendra selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika ITS yang telah banyak sekali memberikan bantuan dan nasehat selama melaksanakan eksperimen tugas akhir ini.
5. Pak Heri, Arif Nur Khoirudin dan Muhammad Arifin yang telah membantu dalam pembuatan instrument
6. Teman-teman seperjuangan tugas akhir eksperimen SPAR yaitu Irza, Salman, Naufal dan Arif yang telah bersabar dan berusaha keras selama mengerjakan tugas akhir ini. Banyak sekali kenangan yang tidak akan terlupakan dari awal pengerjaan hingga laporan tugas akhir ini selesai dibuat
7. Teman-teman pengurus Lab Hidrodinamika ITS dan Valtameri yang selalu memberikan motivasi selama mengerjakan tugas akhir ini.

## DAFTAR ISI

<b>COVER .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xix</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. LATAR BELAKANG .....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH.....	4
1.3. TUJUAN PENELITIAN .....	4
1.4. MANFAAT.....	5
1.5. BATASAN MASALAH.....	5
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b>	
2.1. TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.2. DASAR TEORI.....	10
2.2.1. Teori Gerakan Bangunan Apung .....	10
2.2.2. Beban Hidrodinamika .....	11
2.2.3. Gaya Eksitasi .....	12
2.2.4. Gaya Reaksi .....	13
2.2.5. Persamaan Gerak .....	15
2.2.6. RAO .....	18
2.2.7. Sistem Tambat (Mooring System).....	19
2.2.8. Teori Permodelan.....	21



### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1.	DIAGRAM ALIR.....	25
3.2.	PENJELASAN DIAGRAM ALIR.....	28
3.2.1.	Studi Literatur dan Pengumpulan Data .....	28
3.2.2.	Pemodelan Numeris dan Eksperimen. ....	29
3.2.3.	Validasi Model.....	30
3.2.4.	Rancang Model.....	30
3.2.5.	Kalibrasi Model .....	31
3.2.6.	Rancang Sistem Tambat.....	31
3.2.7.	Parameter Sistem Tambat.....	33
3.2.8.	Instrumen Laboratorium.....	34
3.2.9.	Metode Analitis.....	35
3.2.10.	Metode Numeris .....	35
3.2.11.	Metode Eksperimen .....	37
3.3.	TIMELINE .....	40

### **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

4.1.	PEMODELAN STRUKTUR.....	41
4.1.1.	Pemodelan Numerik.....	41
4.1.2.	Pemodelan Eksperimen .....	43
4.2.	PEMODELAN TALI TAMBAT .....	51
4.3.	VALIDASI MODEL .....	53
4.3.1.	Validasi Model Numerik .....	53
4.3.2.	Validasi Model Eksperimen .....	54
4.4.	INSTRUMEN PENGUKURAN .....	58
4.4.1.	Kalibrasi Gyroscope.....	59
4.4.2.	Kalibrasi Image Processing .....	63
4.4.3.	Kalibrasi <i>Load cell</i> .....	67
4.5.	RAO TERAPUNG BEBAS .....	73
4.5.1.	Metode Analitis.....	73
4.5.2.	Metode Numeris .....	80
4.5.3.	Metode Eksperimen .....	81
4.5.4.	Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen ..	88
4.6.	RAO TERTAMBAT .....	90

4.6.1.	Kekakuan Tali Tambat.....	90
4.6.2.	Metode Analitis.....	95
4.6.3.	Metode Numeris .....	97
4.6.4.	Metode Eksperimen .....	99
4.6.5.	Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen .....	106
4.7.	TEGANGAN TALI.....	109
4.7.1.	Metode Numeris .....	110
4.7.2.	Metode Eksperimen .....	112
4.7.3.	Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen.....	117
4.8.	STUDI PARAMETRIS .....	120
4.8.1.	Gerak Free Floating .....	121
4.8.2.	Gerak Tertambat .....	123
4.8.3.	Tegangan Tali Tambat .....	125

## **BAB V PENUTUP**

5.1.	KESIMPULAN.....	129
5.2.	SARAN.....	130

DAFTAR PUSTAKA .....	131
----------------------	-----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1.</b> SPAR Mad Dog yang beroperasi.....	1
<b>Gambar 1.2.</b> Contoh Truss SPAR .....	2
<b>Gambar 1.3.</b> Tampak Samping Konfigurasi Mooring.....	3
<b>Gambar 1.4.</b> Tampak Atas Konfigurasi Mooring .....	4
<b>Gambar 2.1.</b> Classic SPAR dengan helical strakes .....	8
<b>Gambar 2.2.</b> Konfigurasi Truss SPAR .....	9
<b>Gambar 2.3.</b> Konfigurasi Cell SPAR .....	10
<b>Gambar 2.4.</b> Derajat kebebasan bangunan apung .....	11
<b>Gambar 2.5.</b> Interaksi Hidro-Struktru .....	11
<b>Gambar 2.6.</b> Persamaan masa tambah untuk bentuk silinder .....	14
<b>Gambar 2.7.</b> Contoh RAO .....	19
<b>Gambar 2.8.</b> Sistem tambat tipe catenary .....	20
<b>Gambar 2.9.</b> Sistem tambat tipe taut .....	20
<b>Gambar 3.1.</b> Rencana Model SPAR.....	31
<b>Gambar 3.2.</b> Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR.....	32
<b>Gambar 3.3.</b> Model SPAR dengan sistem tambat.....	32
<b>Gambar 3.4.</b> Rencana Sistem Jangkar .....	33
<b>Gambar 3.5.</b> Instrumen Image Processing.....	34
<b>Gambar 3.6.</b> Diagram Metodologi Umum Eksperimen Bangunan Terapung .....	35
<b>Gambar 3.7.</b> <i>Setup</i> model tanpa tali tambat ( <i>free floating</i> ) .....	38
<b>Gambar 3.8.</b> <i>Setup</i> model dengan tali tambat ( <i>mooring</i> ).....	39
<b>Gambar 4.1.</b> Tampak isometri model numerik .....	42
<b>Gambar 4.2.</b> Tampak isometri model numerik dengan meshing .....	42
<b>Gambar 4.3.</b> Tampak atas model numerik dengan <i>meshing</i> .....	42
<b>Gambar 4.4.</b> Tampak depan model numerik dengan <i>meshing</i> .....	43
<b>Gambar 4.5.</b> Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik .....	44
<b>Gambar 4.6.</b> Tampak depan model fisik (a), Tampak geladak (b) dan <i>Fairlead</i> model (c).....	45
<b>Gambar 4.7.</b> Desain pemberat dan ulir.....	46
<b>Gambar 4.8.</b> Bahan tali tambat .....	51
<b>Gambar 4.9.</b> Katalog properties <i>wire rope</i> .....	52

<b>Gambar 4.10.</b> Bahan tali tambat skenario tes pendulum kondisi 1 untuk perhitungan jari-jari girasi .....	55
<b>Gambar 4.11.</b> Tes pendulum kondisi 1.....	55
<b>Gambar 4.12.</b> Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi .....	56
<b>Gambar 4.13.</b> Tes pendulum kondisi 2.....	56
<b>Gambar 4.14.</b> Instrumen <i>gyroscope</i> .....	59
<b>Gambar 4.15.</b> Geladak dan busur .....	59
<b>Gambar 4.16.</b> <i>Gyroscope</i> pada geladak model fisik .....	60
<b>Gambar 4.17.</b> <i>Gyroscope</i> dan geladak saat proses kalibrasi.....	60
<b>Gambar 4.18.</b> Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam.....	61
<b>Gambar 4.19.</b> Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk.....	62
<b>Gambar 4.20.</b> Kamera dan bola yang ditinjau .....	63
<b>Gambar 4.21.</b> Sketsa model fisik dalam <i>Image Processing</i> .....	64
<b>Gambar 4.22.</b> Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau.....	64
<b>Gambar 4.23.</b> Webcam Logitech c270 dengan lensa <i>fixed focus</i> .....	64
<b>Gambar 4.24.</b> Model fisik dengan bola merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan <i>image processing</i> .....	65
<b>Gambar 4.25.</b> <i>Background image</i> yang digunakan sebagai gambar acuan .....	66
<b>Gambar 4.26.</b> Keluaran grafik dari data <i>frame</i> yang dihasilkan untuk gerakan <i>heave</i> dan <i>surge</i> .....	66
<b>Gambar 4.27.</b> Keluaran datalog dari data <i>frame</i> yang dihasilkan.....	66
<b>Gambar 4.28.</b> Konfigurasi <i>Load cell</i> (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)....	67
<b>Gambar 4.29.</b> Instrumen <i>Load cell</i> dan arah beban .....	68
<b>Gambar 4.30.</b> Keempat <i>Load cell</i> yang digunakan.....	68
<b>Gambar 4.31.</b> Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E) .....	69
<b>Gambar 4.32.</b> Grafik kalibrasi <i>Load cell</i> 1 .....	69
<b>Gambar 4.33.</b> Grafik kalibrasi <i>Load cell</i> 2 .....	71
<b>Gambar 4.34.</b> Grafik kalibrasi <i>Load cell</i> 3 .....	72
<b>Gambar 4.35.</b> Grafik kalibrasi <i>Load cell</i> 4 .....	73
<b>Gambar 4.36.</b> Grafik RAO <i>surge</i> analitis.....	76
<b>Gambar 4.37.</b> Grafik RAO <i>heave</i> analitis.....	77
<b>Gambar 4.38.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> analitis.....	79
<b>Gambar 4.39.</b> Grafik RAO <i>surge</i> numerik .....	80

<b>Gambar 4.40.</b> Grafik RAO <i>heave</i> numerik.....	81
<b>Gambar 4.41.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> numeris.....	81
<b>Gambar 4.42.</b> Konfigurasi tali penahan <i>drift</i> .....	82
<b>Gambar 4.43.</b> Model SPAR kondisi terapung bebas.....	82
<b>Gambar 4.44.</b> Lampu untuk penerangan .....	83
<b>Gambar 4.45.</b> Kode eksperimen.....	83
<b>Gambar 4.46.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan <i>surge</i> ...	84
<b>Gambar 4.47.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan <i>heave</i> .	84
<b>Gambar 4.48.</b> Time History instrumen gyroscope untuk gerakan <i>pitch</i> .....	84
<b>Gambar 4.49.</b> Grafik RAO <i>surge</i> hasil eksperimen .....	85
<b>Gambar 4.50.</b> Grafik RAO <i>heave</i> hasil eksperimen.....	86
<b>Gambar 4.51.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	87
<b>Gambar 4.52.</b> Perbandingan RAO <i>surge</i> secara analitis, numeris dan eksperimen .....	88
<b>Gambar 4.53.</b> Perbandingan RAO <i>heave</i> secara analitis, numeris dan eksperimen .....	89
<b>Gambar 4.54.</b> Perbandingan RAO <i>pitch</i> secara analitis, numeris dan eksperimen .....	90
<b>Gambar 4.55.</b> Konfigurasi SPAR.....	92
<b>Gambar 4.56.</b> Parameter geometris tali tambat.....	92
<b>Gambar 4.57.</b> Titik bayangan.....	95
<b>Gambar 4.58.</b> RAO <i>Surge</i> tertambat metode analitis.....	96
<b>Gambar 4.59.</b> RAO <i>heave</i> tertambat metode analitis.....	97
<b>Gambar 4.60.</b> RAO <i>Pitch</i> tertambat metode analitis.....	97
<b>Gambar 4.61.</b> Kondisi tertambat dalam MOSES.....	98
<b>Gambar 4.62.</b> RAO <i>surge</i> tertambat metode numerik.....	98
<b>Gambar 4.63.</b> RAO <i>heave</i> tertambat metode numerik .....	99
<b>Gambar 4.64.</b> RAO <i>pitch</i> tertambat metode numerik .....	100
<b>Gambar 4.65.</b> Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat.....	100
<b>Gambar 4.66.</b> Ekseperimen SPAR Tertambat .....	100
<b>Gambar 4.67.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan <i>heave</i> tertambat.....	102
<b>Gambar 4.68.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan <i>surge</i> tertambat.....	102
<b>Gambar 4.69.</b> <i>Time History</i> instrumen gyroscope untuk gerakan <i>pitch</i> tertambat .....	102

<b>Gambar 4.70.</b> Grafik RAO <i>surge</i> tertambat eksperimen.....	103
<b>Gambar 4.71.</b> Grafik RAO <i>heave</i> tertambat eksperimen .....	105
<b>Gambar 4.72.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> tertambat eksperimen.....	106
<b>Gambar 4.73.</b> Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen.....	107
<b>Gambar 4.74.</b> Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.....	107
<b>Gambar 4.75.</b> Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.....	108
<b>Gambar 4.76.</b> Posisi <i>Line I, II, III dan IV</i> .....	109
<b>Gambar 4.77.</b> Kondisi <i>Load cell</i> dalam air.....	110
<b>Gambar 4.78.</b> Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR .....	111
<b>Gambar 4.79.</b> RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik .....	111
<b>Gambar 4.80.</b> RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik.....	112
<b>Gambar 4.81.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>load cell</i> tali tambat 1 .....	113
<b>Gambar 4.82.</b> <i>Time History</i> instrumen <i>load cell</i> tali tambat 3.....	113
<b>Gambar 4.83.</b> <i>Time history</i> instrumen <i>load cell</i> tali tambat 4 .....	113
<b>Gambar 4.84.</b> Grafik RAO tegangan tali tambat <i>load cell</i> 1 hasil eksperimen .	114
<b>Gambar 4.85.</b> Grafik RAO tegangan tali tambat <i>load cell</i> 3 hasil eksperimen .	116
<b>Gambar 4.86.</b> Grafik RAO tegangan tali tambat <i>load cell</i> 4 hasil eksperimen .	117
<b>Gambar 4.87.</b> Perbandingan RAO <i>Tension line I</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	118
<b>Gambar 4.88.</b> Perbandingan RAO <i>Tension line II</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	119
<b>Gambar 4.89.</b> Perbandingan RAO <i>Tension line III</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	119
<b>Gambar 4.90.</b> Perbandingan RAO <i>Tension line IV</i> tertambat metode numeris dan eksperimen.....	120
<b>Gambar 4.91.</b> Variasi <i>headingg</i> SPAR tertambat .....	121
<b>Gambar 4.92.</b> Grafik RAO <i>surge</i> tertambat variasi <i>headingg</i> .....	121
<b>Gambar 4.93.</b> Grafik RAO <i>heave</i> free floating variasi <i>headingg</i> .....	122
<b>Gambar 4.94.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> tertambat variasi <i>headingg</i> .....	123
<b>Gambar 4.95.</b> Grafik RAO <i>surge</i> tertambat variasi <i>headingg</i> .....	124
<b>Gambar 4.96.</b> Grafik RAO <i>heave</i> tertambat variasi <i>headingg</i> .....	124
<b>Gambar 4.97.</b> Grafik RAO <i>pitch</i> tertambat variasi <i>headingg</i> .....	125

<b>Gambar 4.98.</b> Grafik RAO Tension line I variasi <i>headingg</i> .....	126
<b>Gambar 4.99.</b> Grafik RAO Tension line II variasi <i>heading</i> .....	127
<b>Gambar 4.100.</b> Grafik RAO Tension line III variasi <i>headingg</i> .....	128
<b>Gambar 4.101.</b> Grafik RAO Tension line IV variasi <i>headingg</i> .....	128

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling</i> .....	23
<b>Tabel 3.1.</b> Dimensi Mini Spar.....	28
<b>Tabel 3.2.</b> Distribusi Massa Mini Spar.....	29
<b>Tabel 3.3.</b> Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS .....	29
<b>Tabel 4.1.</b> Data dimensi struktur SPAR. ....	41
<b>Tabel 4.2.</b> Distribusi massa SPAR .....	43
<b>Tabel 4.3.</b> Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Fraude .....	44
<b>Tabel 4.4.</b> Hasil pengukuran berat material.....	45
<b>Tabel 4.5.</b> Perhitungan momen inersia massa Pipa PVC .....	47
<b>Tabel 4.6.</b> Perhitungan momen inersia massa Blok A .....	47
<b>Tabel 4.7.</b> Perhitungan momen inersia massa Blok B .....	48
<b>Tabel 4.8.</b> Perhitungan momen inersia massa <i>topside</i> .....	48
<b>Tabel 4.9.</b> Perhitungan momen inersia massa ulir .....	49
<b>Tabel 4.10.</b> Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai .....	49
<b>Tabel 4.11.</b> Pusat massa model.....	50
<b>Tabel 4.12.</b> Jari-jari girasi model .....	50
<b>Tabel 4.13.</b> Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan	50
<b>Tabel 4.14.</b> Properti mooring line wire rope .....	51
<b>Tabel 4.15.</b> Spesifikasi tali tambat eksperimen .....	51
<b>Tabel 4.16.</b> Spesifikasi tali tambat model fisik.....	52
<b>Tabel 4.17.</b> Perbandingan kekakuan <i>prototype</i> dengan data kekakuan <i>wire rope</i> acuan .....	53
<b>Tabel 4.18.</b> Data properties tali tambat yang digunakan pada model fisik .....	53
<b>Tabel 4.19.</b> Perbandingan dan validasi model numerik dengan data.....	54
<b>Tabel 4.20.</b> Sarat dan displacement model fisik .....	54
<b>Tabel 4.21.</b> Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test.....	56
<b>Tabel 4.22.</b> Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2. ....	57
<b>Tabel 4.23.</b> Validasi model fisik .....	58
<b>Tabel 4.24.</b> Kalibrasi searah jarum jam.....	61
<b>Tabel 4.25.</b> Kalibrasi berlawanan jarum jam.....	62
<b>Tabel 4.26.</b> Persamaan <i>trendline</i> Arduino .....	63
<b>Tabel 4.27.</b> Data kalibrasi <i>load cell</i> 1 percobaan 1 .....	70



<b>Tabel 4.28.</b> Data kalibrasi <i>load cell</i> 2 .....	70
<b>Tabel 4.29.</b> Data kalibrasi <i>load cell</i> 3 .....	71
<b>Tabel 4.30.</b> Data kalibrasi <i>load cell</i> 4 .....	72
<b>Tabel 4.31.</b> Persamaan Kalibrasi Keluaran <i>Load cell</i> dengan Beban .....	73
<b>Tabel 4.32.</b> Perbandingan <i>displacement</i> dari hasil data, analitik dan numerik ....	74
<b>Tabel 4.33.</b> Parameter Perhitungan RAO .....	75
<b>Tabel 4.34.</b> Parameter Perhitungan RAO <i>Heave</i> . ....	77
<b>Tabel 4.35.</b> Parameter Perhitungan RAO <i>Pitch</i> .....	79
<b>Tabel 4.36.</b> Periode lingkungan dan periode eksperimen .....	83
<b>Tabel 4.37.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen .....	85
<b>Tabel 4.38.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen.....	86
<b>Tabel 4.39.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	87
<b>Tabel 4.40.</b> Perbandingan RAO <i>surge</i> terapung bebas .....	88
<b>Tabel 4.41.</b> Perbandingan RAO <i>heave</i> terapung bebas.....	89
<b>Tabel 4.42.</b> Perbandingan RAO <i>pitch</i> terapung bebas .....	89
<b>Tabel 4.43.</b> Perhitungan <i>Pre Tension</i> dan Panjang Akibat <i>Pre-Tension</i> .....	91
<b>Tabel 4.44.</b> Sudut sebar tali. ....	91
<b>Tabel 4.45.</b> Kekakuan <i>surge</i> .....	91
<b>Tabel 4.46.</b> Konfigurasi Sudut Tanah-Tali.....	93
<b>Tabel 4.47.</b> Kekakuan Karakteristik.....	93
<b>Tabel 4.48.</b> Kekakuan mode gerak <i>heave</i> .....	94
<b>Tabel 4.49.</b> Kekakuan mode gerak <i>pitch</i> .....	95
<b>Tabel 4.50.</b> Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan.....	101
<b>Tabel 4.51.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen kondisi tertambat .....	103
<b>Tabel 4.52.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen kondisi tertambat .....	104
<b>Tabel 4.53.</b> Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	105
<b>Tabel 4.54.</b> Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat.....	106
<b>Tabel 4.55.</b> Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat.....	108
<b>Tabel 4.56.</b> Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat.....	109
<b>Tabel 4.57.</b> <i>Tension Force</i> maksimum tiap tali tambat pada MOSES.....	110
<b>Tabel 4.58.</b> Data <i>load cell</i> 1 hasil eksperimen.....	114
<b>Tabel 4.59.</b> Data <i>load cell</i> 3 hasil eksperimen.....	115

<b>Tabel 4.60.</b> Respon tegangan dan RAO tegangan tali tambat <i>load cell</i> 4 hasil eksperimen .....	116
<b>Tabel 4.61.</b> Perbandingan <i>Tension Line</i> I.....	118
<b>Tabel 4.62.</b> Perbandingan <i>Tension Line</i> II.....	118
<b>Tabel 4.63.</b> Perbandingan <i>Tension Line</i> III .....	120
<b>Tabel 4.64.</b> Perbandingan <i>Tension Line</i> IV .....	120
<b>Tabel 4.65.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>surge</i> terapung bebas .....	121
<b>Tabel 4.66.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>heave</i> terapung bebas.....	122
<b>Tabel 4.67.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>pitch</i> terapung bebas .....	123
<b>Tabel 4.68.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>surge</i> tertambat.....	123
<b>Tabel 4.69.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>heave</i> tertambat .....	125
<b>Tabel 4.70.</b> Variasi <i>Heading</i> RAO <i>pitch</i> tertambat.....	125
<b>Tabel 4.71.</b> Variasi <i>Heading</i> <i>Tension Line</i> I .....	126
<b>Tabel 4.72.</b> Variasi <i>Heading</i> <i>Tension Line</i> II .....	126
<b>Tabel 4.73.</b> Variasi <i>Heading</i> <i>Tension Line</i> III.....	127
<b>Tabel 4.74.</b> Variasi <i>Heading</i> <i>Tension Line</i> IV .....	128

## **DAFTAR LAMPIRAN**

LAMPIRAN A (SKRIP MOSES)

LAMPIRAN B (TABULASI DISTRIBUSI MASA)

LAMPIRAN C (PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR)

LAMPIRAN D (STUDI ANALITIS *FREE FLOATING*)

LAMPIRAN E (STUDI ANALITIS TERTAMBAT)

LAMPIRAN F (STUDI NUMERIS *FREE FLOATING*)

LAMPIRAN G (STUDI NUMERIS TERTAMBAT)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. LATAR BELAKANG**

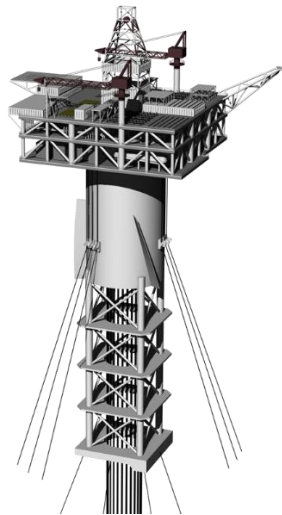
Salah satu jenis struktur terapung yang dapat digunakan sebagai fasilitas pengeboran dan produksi minyak dan gas lepas pantai di laut dalam adalah SPAR. Selain sebagai keperluan pemenuhan kebutuhan energi konvensional (minyak dan gas bumi), SPAR juga sedang dikembangkan sebagai opsi bangunan terapung untuk fasilitas turbin angin lepas pantai (Duan, et al., 2016; Koo, et al., 2012). Salah satu keunggulan dari SPAR adalah respon gerakan *heave* dan *pitch* dari SPAR mempunyai nilai yang rendah (Sudhakar, et al., 2011).

SPAR merupakan bangunan apung dengan struktur utama berupa silinder dimana daya apung silinder ini digunakan untuk menahan beban dari bangunan atas (Deep Oil Technology Inc, 1995). Salah satu SPAR yang sedang beroperasi adalah SPAR Mad Dog (Gambar 1.1). Dalam perkembangannya, bentuk SPAR dimulai hanya dengan terdiri dari bentuk lambung silinder dengan sarat yang dalam beserta fasilitas bangunan atasnya. Struktur model tersebut dinamakan *Classic SPAR*. Lambung silinder dari SPAR kemudian juga diberikan *helical strake* pada permukaan silinder untuk mengurangi gaya drag, VIV (Rho, et al., 2003), sehingga olah gerak SPAR menjadi lebih baik. Lambung silinder dari SPAR pada umumnya berfungsi juga sebagai tempat penyimpanan produk minyak dan gas di bagian tengahnya dan ballast di bagian dasarnya (Mansouri, et al., 2009). SPAR juga memiliki stabilitas absolut yang didapat dengan meletakkan titik berat total struktur berada di bawah letak titik gaya apung.



**Gambar 1.1.** SPAR Mad Dog yang beroperasi (Rigzone, 1999)

Sebagai variasi dari bentuk *Classic* SPAR, lambung silinder dari SPAR dikombinasikan dengan struktur *truss* sehingga terbentuk bangunan baru bernama *Truss SPAR* (Gambar 1.2). Dengan menggunakan *Truss SPAR*, panjang dari struktur lambung silinder dapat direduksi sehingga berat struktur dan biaya fabrikasi dapat berkurang. Selanjutnya, juga berkembang jenis *Cell SPAR* dimana daya apung didapat dari kumpulan silinder-silinder (*cell*) yang berbentuk lebih kecil dan dijadikan satu. Pembuatan dari *Cell SPAR* juga relative lebih mudah dari pembuatan jenis spar lainnya (Sudhakar, et al., 2011). Selain perkembangan dalam perubahan bentuk lambung, beberapa fitur tambahan juga dikembangkan untuk SPAR, seperti penambahan *heave plate* untuk mengurangi gerak *heaving* dari SPAR (Magee, et al., 2000).



**Gambar 1.2.** Contoh Truss SPAR (Keywordsuggest, 2016)

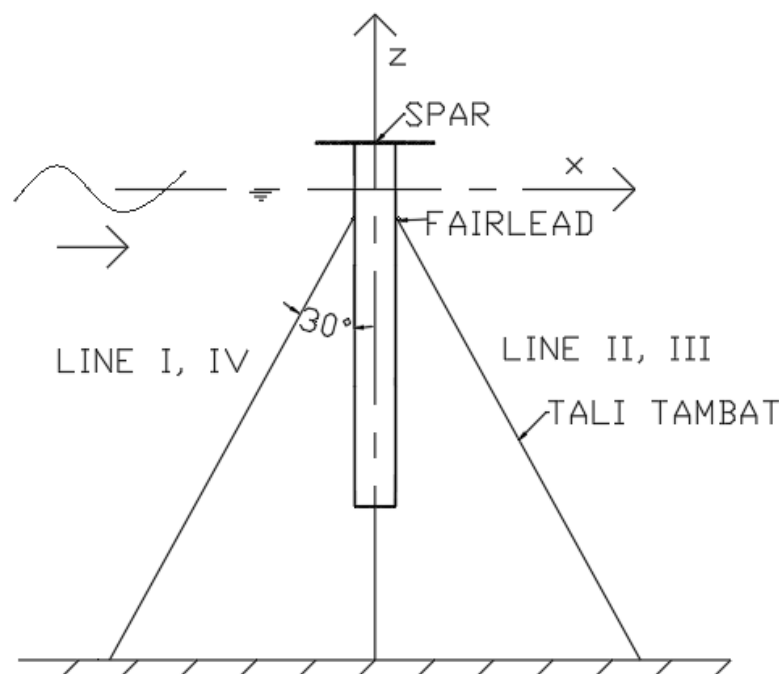
Sebagai bangunan terapung, SPAR akan mengalami beberapa beban, diantaranya: beban gelombang, beban angin dan beban arus. Beban yang paling berpengaruh pada dinamika gerak SPAR adalah beban dinamis dari gelombang. Beban dinamis dari gelombang menyebabkan respon yang dinamis pula pada SPAR. Respon gerak dari SPAR merupakan fungsi dari periode gelombang. Semakin dekat periode beban terhadap periode natural pada mode gerak tertentu akan menyebabkan respon yang lebih besar dibanding rentang periode lain (Djarmiko, 2012).

Bangunan terapung juga membutuhkan sistem tambat untuk menahan tetap berada di posisinya (*station-keeping*). Respon gerak dari bangunan SPAR akan

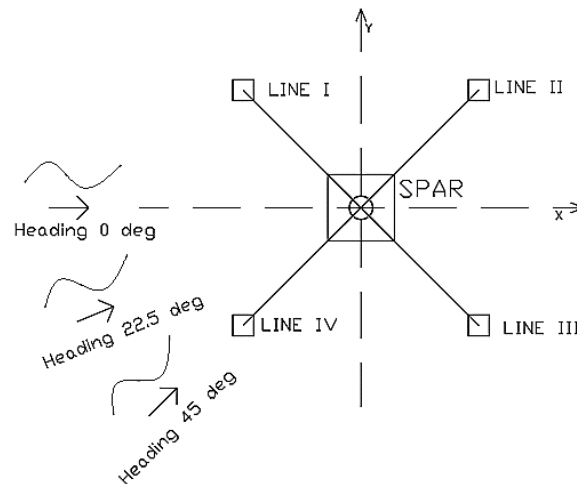
sangat berpengaruh pada tegangan dari sistem tambat, disisi lain sistem tambat juga mempengaruhi gerak bangunan apung. Jenis sistem tambat juga menentukan respon dinamik dari SPAR (Seebai, et al., 2009).

Pada penelitian kali ini dilakukan studi analitis, numeris dan eksperimen dari Classic SPAR mengambil model Mini SPAR dari Deep Oil Technology Inc. (1995) dengan 3 arah datang gelombang berbeda ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ). Metode analitis digunakan untuk mencari RAO (*Response Amplitude Operator*) dari SPAR yang kemudian akan divalidasi menggunakan studi numeris, dengan bantuan software MOSES, dan studi eksperimental. Tegangan tali juga akan ditampilkan dalam bentuk RAO Tension yang dianalisis menggunakan MOSES yang kemudian divalidasi dengan studi eksperimental. Studi numeris yang tervalidasi dengan studi analitis dan eksperimental akan digunakan untuk studi parametrik variasi arah datang gelombang.

Saat kondisi tertambat SPAR mempunyai 4 jenis tali dengan spesifikasi identik. Tali tambat tersebut mempunyai sudut sebesar  $30^\circ$  terhadap *fairlead*. Tali tambat juga membentuk konfigurasi mempunyai sudut sebesar  $45^\circ$  terhadap *centerline* struktur. Konfigurasi tali tambat dapat dilihat di Gambar 1.3 dan 1.4.



**Gambar 1.3.** Tampak Samping Konfigurasi Mooring



**Gambar 1.4.** Tampak Atas Konfigurasi Mooring

## 1.2. RUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana hasil analitis, numeris dan eksperimen respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* SPAR dalam kondisi terapung bebas dengan 3 variasi arah datang gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ )?
2. Bagaimana numeris dan eksperimen respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* dan tegangan tali SPAR kondisi tertambat dengan 3 variasi arah datang gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ )?
3. Manakah arah gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ) yang menyebabkan respon gerakan dan tegangan paling tinggi?

## 1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan yang ingin dicapai oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Menghitung secara analitis, numeris dan melakukan eksperimen respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* SPAR dalam kondisi terapung bebas dengan 3 variasi arah datang gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ).
2. Menghitung numeris dan melakukan eksperimen respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* dan tegangan tali SPAR dalam kondisi tertambat dengan 3 variasi arah datang gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ).
3. Membandingkan arah gelombang ( $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$  dan  $45^\circ$ ) yang menyebabkan respon gerakan dan tegangan paling tinggi.

#### 1.4. MANFAAT

Penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai pertimbangan dalam optimasi penentuan konfigurasi sistem tambat pada Classic SPAR.

#### 1.5. BATASAN MASALAH

Untuk memperjelas permasalahan tugas akhir ini, maka perlu adanya ruang lingkup pengujian atau asumsi-asumsi sebagai berikut :

- a. Studi analitis, numeris dan eksperimen dilakukan pada model SPAR dari JIS
- b. Studi eksperimen dilakukan dengan menyesuaikan keadaan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS
- c. Studi eksperimen hanya memperhatikan main frekuensi respon
- d. Studi analitis dan eksperimen dilakukan pada SPAR dengan *heading*  $0^\circ$
- e. Efek Non-Linear tidak diperhatikan dalam penelitian
- f. SPAR berada dalam 3 derajat kebebasan (*Surge, Heave* dan *Pitch*)
- g. Dalam studi analitis, gerak bangunan apung merupakan gerak *uncoupled*.
- h. Tegangan tali tambat dianalisa dengan metode numeris dan eksperimen
- i. Beban yang diperhitungkan hanya beban gelombang
- j. Nilai damping dianggap konstan dalam melakukan perhitungan analitis
- k. Efek hidrodinamika dari sub-struktur tidak diperhitungkan
- l. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan
- m. Tidak meninjau biaya pada struktur

#### 1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Tugas akhir ini akan dilaporkan dengan sistemika:

BAB I pendahuluan menjelaskan beberapa hal tentang penelitian dalam tugas akhir, yaitu masalah yang melatarbelakangi penelitian sehingga penting untuk dilakukan, perumusan masalah yang menjadi problem dan perlu dijawab, tujuan yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat apa yang didapat dari dilakukannya penelitian tugas akhir, batasan dari penelitian tugas akhir ini, serta penjelasan dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.



BAB II tinjauan pustaka dan dasar teori menjelaskan apa saja yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini serta dasar-dasar teori, persamaan-persamaan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini.

BAB III metodologi penelitian menjelaskan urutan analisis yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dan melakukan validasi dalam tugas akhir ini, beserta pembahasan data.

BAB IV analisis hasil dan pembahasan menjelaskan tentang pemodelan struktur dan tali tambat beserta validasinya, penggunaan instrument eksperimen, studi analitis, studi numeris, studi eksperimen serta studi parametris gerak dan tegangan tali tambat

BAB V kesimpulan dan saran menjelaskan tentang kesimpulan yang telah didapatkan dari hasil analisa pada tugas akhir ini dan saran-saran penulis sebagai pertimbangan dalam keperluan penelitian selanjutnya.

Daftar pustaka yang berisi referensi-referensi yang dipakai selama penelitian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penentuan optimasi konfigurasi tali tambat dari strukur SPAR, studi mengenai dinamika gerak SPAR perlu dilakukan. Chitrapu, et al. (1998) melakukan penelitian mengenai respon SPAR di lingkungan yang berbeda dengan menggunakan simulasi berbasis waktu (*time domain simulation*). Studi SPAR ketika terkena gelombang irregular secara statistik juga dilakukan oleh Mekha, et al. (1998). Studi rinci secara analitis mengenai dinamika SPAR dilakukan juga oleh Agarwal, et al. (2003) dan Irani, et al. (2000). Analisa numeris juga dilakukan untuk melihat sifat dinamis dari SPAR (Nestegård, et al., 2003). Selain kondisi SPAR terapung bebas, interaksi SPAR dengan adanya sistem tambat juga menjadi perhatian. Ran, et al., (1999) membandingkan interaksi mooring menggunakan dua metode analisa yang berbeda, analisa berbasis waktu (*time domain simulation*) dan analisa berbasis frekuensi (*frequency domain simulation*). Analisa numeris dari sistem tambat SPAR juga dilakukan oleh Kristoffersen, et al. (2001). Seebai, et al. (2009) melakukan perbandingan jenis mooring antara *taut mooring* dengan *catenary mooring* pada sebuah SPAR untuk turbin angin. Evaluasi mengenai respon dinamis SPAR tertambat dalam keadaan terputus juga dianalisa oleh Ahmed, et al. (2016)

Agarwal, et al. (2003) menyatakan bahwa SPAR mempunyai beberapa keunggulan dibanding struktur terapung lainnya, diantaranya:

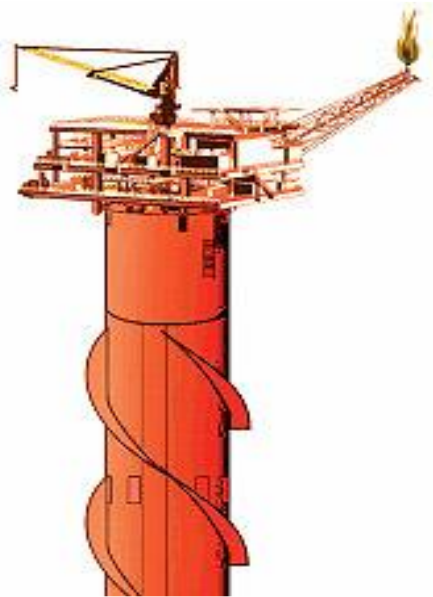
- a. Dapat digunakan pada kedalaman laut mencapai 3000 meter.
- b. Dapat menopang *topside* (bangunan atas) yang besar.
- c. *Riser* yang digunakan untuk produksi terletak ditengah-tengah *center well*.
- d. Selalu stabil karena CB (*centre of buoyancy*) terletak di atas CG (*centre of gravity*).
- e. Dapat mentoleransi berbagai gerakan jika dibandingkan dengan struktur terapung lainnya.
- f. Bagian lambung dapat terbuat dari beton ataupun baja.
- g. Memiliki sedikit sekat pada bagian lambung dan dek.

- h. Minyak bumi dapat disimpan dengan biaya yang minimum.
- i. Sistem tambat (*mooring system*) yang dapat dengan mudah dipasang, dioperasikan, dan dipindahkan.

Dalam perkembangan di industri migas, SPAR dapat dibagi menjadi 3 kelompok (Jaelani, 2008), yaitu:

1. *Classic SPAR*

Pada SPAR bertipe klasik (*Classic SPAR*), struktur SPAR terdiri dari lambung berbentuk silinder dan bangunan atas (*topside*). Lambung berbentuk silinder ini berfungsi sebagai pemberi daya apung pada bangunan SPAR. Selain itu, lambung silinder SPAR juga dimanfaatkan sebagai ruang penyimpanan hidrokarbon. Di bagian dasar lambung juga terdapat ballast untuk mengatur kestabilan dari SPAR. Di tengah silinder terdapat *moonpool* (rongga kosong yang terbuka terhadap lautan) yang berfungsi sebagai tempat riser terhubung terhadap sumur produksi di dasar laut.



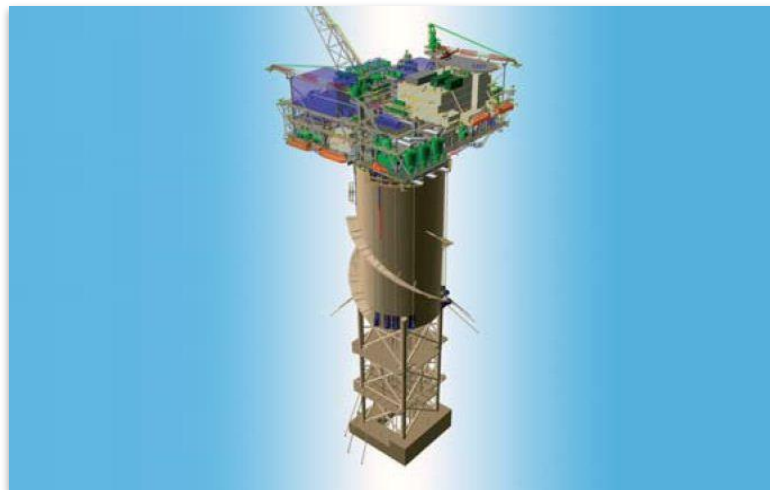
**Gambar 2.1.** Classic SPAR dengan helical strakes (Rigzone, 1999)

Pada lambung silinder, juga terdapat sirip melingkar sepanjang lambung (*helical strakes*) yang digunakan untuk mengurangi efek hidrodinamika dari gelombang. Hal ini berfungsi untuk memperkecil gerakan dan memberikan kestabilan dinamis pada bagian bawah silinder yang diikat dengan *tether*. Disamping itu, empat atau delapan buah *mooring line* masih diperlukan dari

sisi lambung, yang berfungsi untuk menjaga SPAR agar tetap berada di posisi yang diharapkan.

## 2. *Truss SPAR*

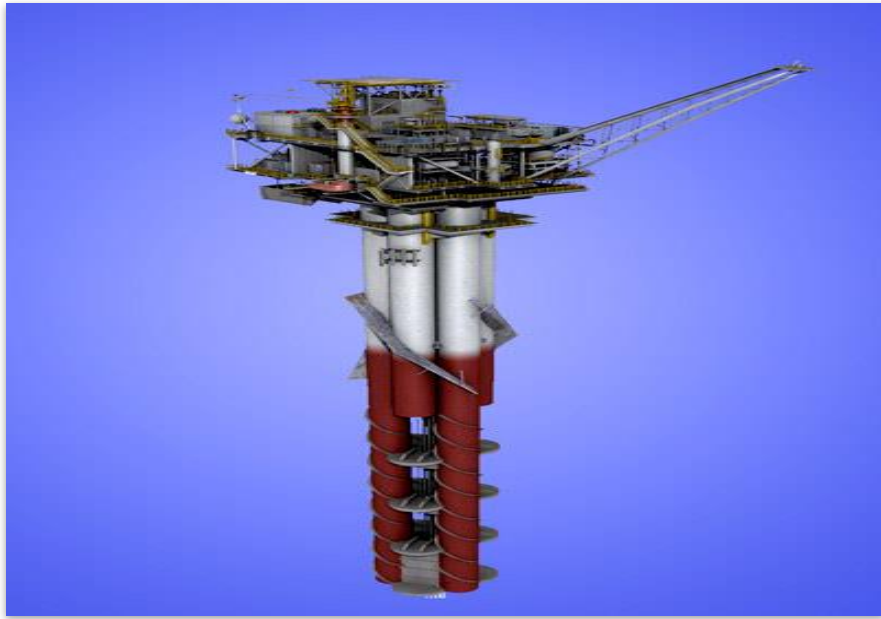
*Truss SPAR* memiliki lambung silinder vertikal yang lebih pendek jika dibandingkan dengan *classic SPAR*. Panjang struktur lambung yang hilang tersebut diganti dengan struktur berbentuk *truss*. *Truss* ini dibagi menjadi beberapa bagian segmen vertikal (biasanya empat segmen). Pada tiap segmen dipasang pelat mendatar berfungsi sebagai penambah redaman gerak *heave*. Bagian bawah dari *Truss SPAR* juga dipasang *soft tank* yang berfungsi sebagai penambah berat agar syarat titik berat dibawah titik gaya apung terpenuhi. Jumlah *tether* penegang tidak lagi sebanyak pada *classic SPAR*, namun *mooring line* masih diperlukan.



**Gambar 2.2.** Konfigurasi Truss SPAR (Subseaworldnews, 2011)

## 3. *Cell SPAR*

*Cell SPAR* memiliki lambung yang terdiri dari silinder-silinder kecil yang dipasangkan berhimpit dengan satu silinder di tengahnya. Pembangunan bentuk *Cell SPAR* lebih mudah dibanding jenis yang lain, karena ukuran silinder yang difabrikasi lebih kecil. Hal ini menyebabkan SPAR tipe sel dapat dibangun di galangan dengan fasilitas terbatas. Secara teknis dan ekonomis SPAR jenis *cell* juga lebih efisien karena tidak memerlukan tether, sehingga pengikatan hanya menggunakan semi-taut mooring sebagai media pengikatnya.



**Gambar 2.3.** Konfigurasi Cell SPAR (Rigzone, 1999)

## **2.2. DASAR TEORI**

### **2.2.1. Teori Gerakan Bangunan Apung**

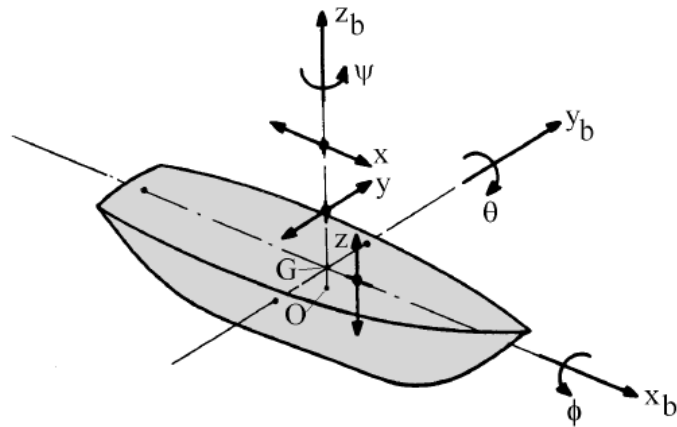
Bangunan apung mempunyai 6 derajat kebebasan (Gambar 2.4). Gerakan ini dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu gerak translasi dan gerak rotasi (Journee, et al., 2001). Gerak translasi merupakan gerakan dimana setiap titik dari bangunan apung bergerak dengan bentuk lintasan yang sama lurus, sedangkan gerak rotasi merupakan gerak dimana setiap titik bangunan apung bergerak dengan lintasan lingkaran. 6 Jenis gerak dari struktur terapung mempunyai penamaan masing-masing yaitu:

#### **1. Mode gerak translasi**

- *Surging*, gerakan osilasi translasi arah sumbu x.
- *Swaying*, gerakan osilasi translasi arah sumbu y.
- *Heaving*, gerakan osilasi translasi arah sumbu z.

#### **2. Mode gerak rotasi**

- *Rolling*, gerakan osilasi rotasi di sumbu x.
- *Pitching*, gerakan osilasi rotasi di sumbu y.
- *Yawing*, gerakan osilasi rotasi di sumbu z.

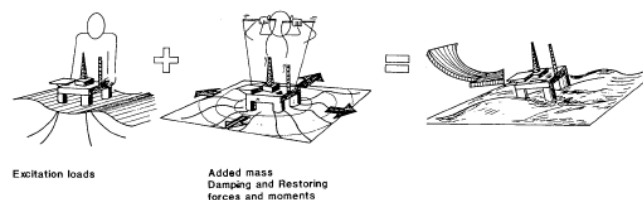


**Gambar 2.4.** Derajat kebebasan bangunan apung (Journee, et al., 2001)

### 2.2.2. Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai 2 sub-masalah (Faltinsen, 1990) diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi namun menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov *Force*) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.



**Gambar 2.5.** Interaksi Hidro-Struktru (Faltinsen, 1990)

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2. Penggabungan antara beban eksitasi dan beban masa tambah, redaman dan kekakuan diilustrasikan seperti Gambar 2.5.

### 2.2.3. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krillof (Faltinsen, 1990). Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan (Journee, et al., 2001). Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi.

Gaya Froude-Krylof dapat dicari menggunakan persamaan 2.1, dengan  $p$  merupakan distribusi tekanan,  $n$  merupakan unit vector dan  $dA$  merupakan luasan kecil dari suatu benda.

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menurunkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan Bernoulli sehingga didapat persamaan 2.2. Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks (Faltinsen, 1990).

$$p = \rho g \zeta_o e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

dengan,

$\rho$	= massa jenis air sekitar struktur (kg/m)
$g$	= percepatan gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
$\zeta_o$	= amplitudo gelombang (m)
$k$	= angka gelombang (rad/m)
$z$	= posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air (m)

$\omega$	= frekuensi gelombang (rad/s)
$t$	= waktu (s)
$x$	= posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang (m)

#### 2.2.4. Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*) dan kekakuan (*stiffness*). Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

##### 1. Massa Tambah (*Added Mass*)



Bessel pada tahun 1828 melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*) (Sarpkaya, 2010). Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung (Newman, 1977). Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah (Sarpkaya, 2010). Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak. Persamaan (2.3) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya (2010) menemukan beberapa nilai masa tambah untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan orientasi *surge* dan *heave* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.3)$$

dengan,

$i$	= mode gerak struktur dengan 1 ( <i>surge</i> ), 2 ( <i>sway</i> ), 3 ( <i>heave</i> ), 4 ( <i>roll</i> ), 5 ( <i>pitch</i> ) dan 6 ( <i>yaw</i> )
$a$	= massa tambah (kg)
$\ddot{\xi}$	= respon percepatan gerak struktur (m/s <sup>2</sup> )



SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH	
	←→ MOTION	
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

**Gambar 2.6.** Persamaan masa tambah untuk bentuk silinder (Sarpkaya, 2010)

## 2. Redaman (*damping*)

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1977). Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.4). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabarti, 1994)

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.4)$$

dengan,

- $i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)
- $b$  = redaman sistem (N s/m)
- $\dot{\xi}$  = respon kecepatan gerak struktur (m/s)

## 3. Kekakuan (*stiffness*)

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave* ( $\xi_3$ ), *pitch* ( $\xi_{44}$ ) dan *roll* ( $\xi_5$ ) (Djarmiko,

2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatik struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.5). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.5)$$

dengan,

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4. (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$c$  = kekakuan struktur (N/m)

$\xi$  = respon gerak struktur (m)

Nilai  $c$  dari *heave*, *roll* dan *pitch* adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.6)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.7)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.8)$$

dengan,

$\rho$  = massa jenis air sekitar struktur (kg/m)

$g$  = percepatan gravitasi struktur (m/s<sup>2</sup>)

$A_{wp}$  = luas permukaan di garis air (m<sup>2</sup>)

$V$  = volume displacement struktur (m<sup>3</sup>)

$\overline{GM}_T$  = panjang metacentre melintang (m)

$\overline{GM}_L$  = panjang metacentre memanjang (m)

## 2.2.5. Persamaan Gerak

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisa menggunakan hukum II Newton sesuai persamaan 2.9.

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.9)$$

dengan,

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$\sum F$  = resultan gaya (N)

$m$  = massa struktur (kg)

$\ddot{\xi}$  = percepatan struktur (m/s<sup>2</sup>)

Persamaan (2.9) menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang melawan gaya aksi (persamaan 2.10).

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.10)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan 2.10 dapat dikembangkan menjadi persamaan 2.11

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.11)$$

dengan,

$$\sum F = \text{resultan gaya (N)}$$

$$F_a = \text{gaya inersia (N)}$$

$$F_b = \text{gaya redaman (N)}$$

$$F_c = \text{gaya pengembali (N)}$$

Dengan memasukkan persamaan 2.3, 2.4 dan 2.5 ke persamaan 2.10; 2.11 maka didapat persamaan 2.12; 2.13:

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eks} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.12)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eks} \quad (2.13)$$

dengan,

$$i = \text{mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)}$$

$$F_{eks} = \text{gaya eksitasi gelombang (N)}$$

$$m = \text{massa struktur (kg)}$$

$$a = \text{massa tambah (kg)}$$

$$\ddot{\xi} = \text{respon percepatan gerak struktur (m/s}^2\text{)}$$

$$b = \text{nilai redaman sistem (N s/m)}$$

$$\dot{\xi} = \text{respon kecepatan gerak struktur (m/s)}$$

$$c = \text{kekakuan struktur (N/m)}$$

$$\xi = \text{respon posisi gerak struktur (m)}$$

Persamaan (2.13) merupakan persamaan yang tidak memperhatikan gerak kopel bangunan. Dalam pengertian itu, setiap mode gerak tidak mempengaruhi gerak benda yang lain. Di sisi lain, gerak kopel adalah persamaan gerak yang setiap geraknya bisa saling mempengaruhi gerak yang lainnya. Menurut Djatmiko (1992), persamaan gerak kopel untuk kondisi terapung dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks, dengan persamaan 2.14

$$\sum_{n=1}^6 \left[ (M_{jk} + A_{jk}) \xi_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \ddot{\xi}_k \right] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.14)$$

dengan:

- $M_{jk}$  = matriks massa bangunan apung
- $A_{jk}$  = matriks massa tambah bangunan apung
- $B_{jk}$  = matriks redaman bangunan apung
- $C_{jk}$  = matriks kekakuan bangunan apung
- $F_j$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks. F1, F2, dan F3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway*, dan *heave*. Sedangkan F4, F5, dan F6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Pada kasus bangunan apung yang tertambat persamaan gerak (2.14) menjadi persamaan 2.15 (Chen, 2011)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[ -\omega^2 (\delta_{nm} \mathbf{M}_{jk}^{nm} + \mathbf{A}_{jk}^{nm}) - i\omega \mathbf{B}_{jk}^{nm} + \delta_{nm} \mathbf{C}_{jk}^{nm} + \mathbf{C}_{jk}^{*nm} \right] \xi_j = \mathbf{F}_j^n \quad (2.15)$$

dengan,

- $n$  = 1, 2, 3...M menunjukkan jumlah nth struktur,
- $\delta_{nm}$  = symbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika  $n \neq m$  dan 1 jika  $n = m$ , sehingga  $\mathbf{M}_{jk}^{mm}$  and  $\mathbf{C}_{jk}^{mm}$  adalah matriks inersia dan hidrostatik dari bangunan  $m^{th}$
- $\mathbf{A}_{jk}^{nm}$  = matriks massa tambah untuk bangunan  $m^{th}$  akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks massa tambah bangunan  $m^{th}$  akibat bangunan  $n^{th}$  ( $n \neq m$ ),

$\mathbf{B}_{jk}^{nm}$  = matrik redaman hidrodinamika untuk bangunan mth akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks redaman hidrodinamika mth akibat bangunan nth saat ( $n \neq m$ ),

$\mathbf{C}_{jk}^{*nm}$  = matrik kekakuan untuk bangunan mth akibat gerak bangunan sendiri ( $n = m$ ), dan matriks kekakuan mth akibat bangunan nth saat ( $n \neq m$ )

$\mathbf{F}_j^n$  = matriks gaya eksitasi pada bangunan nth.

Berdasarkan Van Malree dan Van Boom (1991), komponen eksitasi terdiri dari gaya gelombang orde 1 ( $\mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)}$ ), gaya gelombang orde 2 ( $\mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)}$ ), arus ( $\mathbf{F}_{j-c}^n$ ), angin ( $\mathbf{F}_{j-w}^n$ ), mesin pendorong ( $\mathbf{F}_{j-th}^n$ ) dan sistem control lainnya ( $\mathbf{F}_{j-ct}^n$ ) seperti sirip penstabil (stabilizing fins). Sehingga matriks gaya eksitasi menjadi

$$\mathbf{F}_j^n = \mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)} + \mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)} + \mathbf{F}_{j-c}^n + \mathbf{F}_{j-w}^n + \mathbf{F}_{j-th}^n + \mathbf{F}_{j-ct}^n \quad (2.16)$$

## 2.2.6. RAO

*Response Amplitude Operator* (RAO) merupakan nilai untuk mentransfer beban luar dalam hal ini gelombang dalam rentang frekuensi menjadi bentuk respon yang diterima pada suatu struktur. Sehingga umumnya RAO juga dikenal sebagai *transfer function*. Selain itu RAO juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang ( $\xi_{\text{respon}}/\xi_{\text{gelombang}}$ ). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan maupun getaran.

RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang). Persamaan 2.15 (Journé, et al., 2001) menunjukkan RAO.

$$RAO(\omega) = \left( \frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} \right) = \left( \frac{\xi_{k0}}{\xi_0} \right) \quad (2.15)$$

dengan:

$\xi_{k0}$  = amplitudo respon struktur (m)

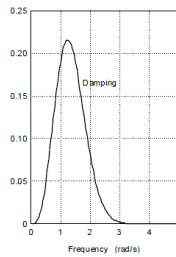
$\xi_0$  = amplitudo gelombang (m)

Sedangkan untuk RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden (Journey, et al., 2001).

$$RAO(\omega) = \frac{\xi_{k0}}{K_w \zeta_0} = \frac{\xi_{k0}}{\left(\omega^2/g\right) \zeta_0} \quad (2.16)$$

dengan:

- $\xi_{k0}$  = amplitudo respon struktur (m)
- $\zeta_0$  = amplitudo gelombang (m)
- $k_w$  = angka gelombang (rad/m)
- $\omega$  = frekuensi gelombang (rad/m)
- $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)



**Gambar 2.7.** Contoh RAO (Journey, et al., 2001)

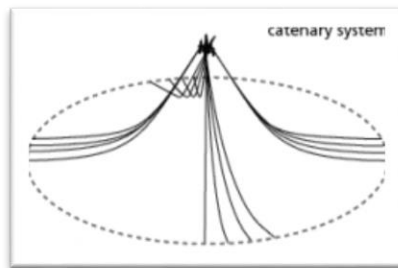
### 2.2.7. Sistem Tambat (Mooring System)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetis (*syntetic rope*). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut:

1. *Catenary Line Mooring*

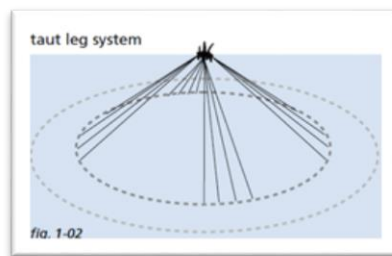
Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



**Gambar 2.7.** Sistem tambat tipe catenary (Rigzone, 1999)

2. *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi *mooring lines* dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



**Gambar 2.8.** Sistem tambat tipe taut (rigzone, 2006)

Persamaan dalam menganalisa sistem tambat dapat dilakukan dengan persamaan 2.17. Persamaan ini merupakan keseimbangan antara persamaan gerak yang mengakomodir gaya eksitasi akibat arus, angin dan gelombang

kepada struktur. Sesuai dengan Wichers & Huijsmans (1984), Wichers (1986; 1987; 1988a; 1988b) dan API (2001), persamaan analisa sistem tambat sebagai berikut

$$\mathbf{M}(\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{X}_H + \mathbf{X}_W + \mathbf{X}_M + \mathbf{X}^{(2)} \quad (2.17)$$

dengan,

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_6)^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dot{x}_2 \\ 0 & 0 & \dot{x}_6 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_H = \text{vektor gaya hidrodinamika dan gaya arus,}$$

$$\mathbf{X}_W = \text{vektor gaya angin,}$$

$$\mathbf{X}_M = \text{vektor gaya tali tambat}$$

$$\mathbf{X}^{(2)} = \text{vektor gaya orde-2 gelombang}$$

### 2.2.8. Teori Permodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al., 2009)

#### 1. Kesamaan geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.18)$$



Dimana  $l_p$  dan  $l_m$  dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan  $\alpha$  merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai  $\lambda$ .

## 2. Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada prototipe dengan kecepatan model yang bersesuaian harus konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu. Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan prototipe, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan prototipe, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

## 3. Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

## 4. Hukum Model Froude

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.19)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.20)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah  $\lambda$ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude

**Tabel 2.1.** *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994)*

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIT</b>	<b>SCALE FACTOR</b>	<b>REMARKS</b>
<b>GEOMETRY</b>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Volume</i>	$L^3$	$\lambda^3$	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Measured from a fixed point</i>
<b>VARIABLE</b>	<b>UNIT</b>	<b>SCALE FACTOR</b>	<b>REMARKS</b>
<i>Moment of Inertia</i>	$ML^2$	$\lambda^5$	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Mass</i>			
<i>Center of Gravity</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Measured from a reference point</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>
<b>WAVE MECHANICS</b>			
<i>Wave Height</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Consecutive crest to trough distance</i>
<i>Wave Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>

**Tabel 2.1.** *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (lanjutan)*

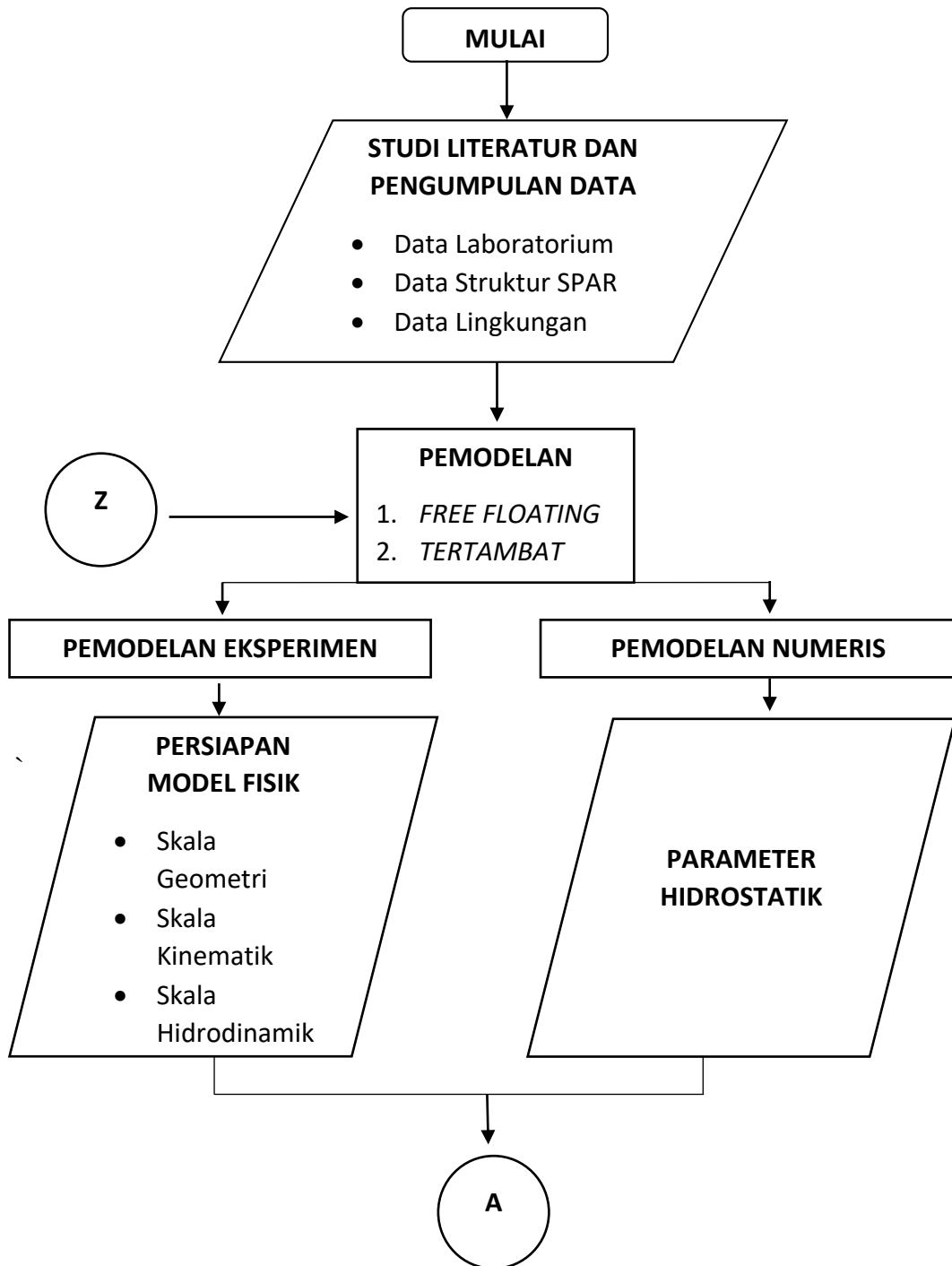
<b><i>VARIABLE</i></b>	<b><i>UNIT</i></b>	<b><i>SCALE FACTOR</i></b>	<b><i>REMARKS</i></b>
<i>Wave Elevation</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<b><i>KINEMATICS &amp; DYNAMICS</i></b>			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	$MT^{-2}$	$\lambda^2$	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ration of damping and critical damping coefficient</i>

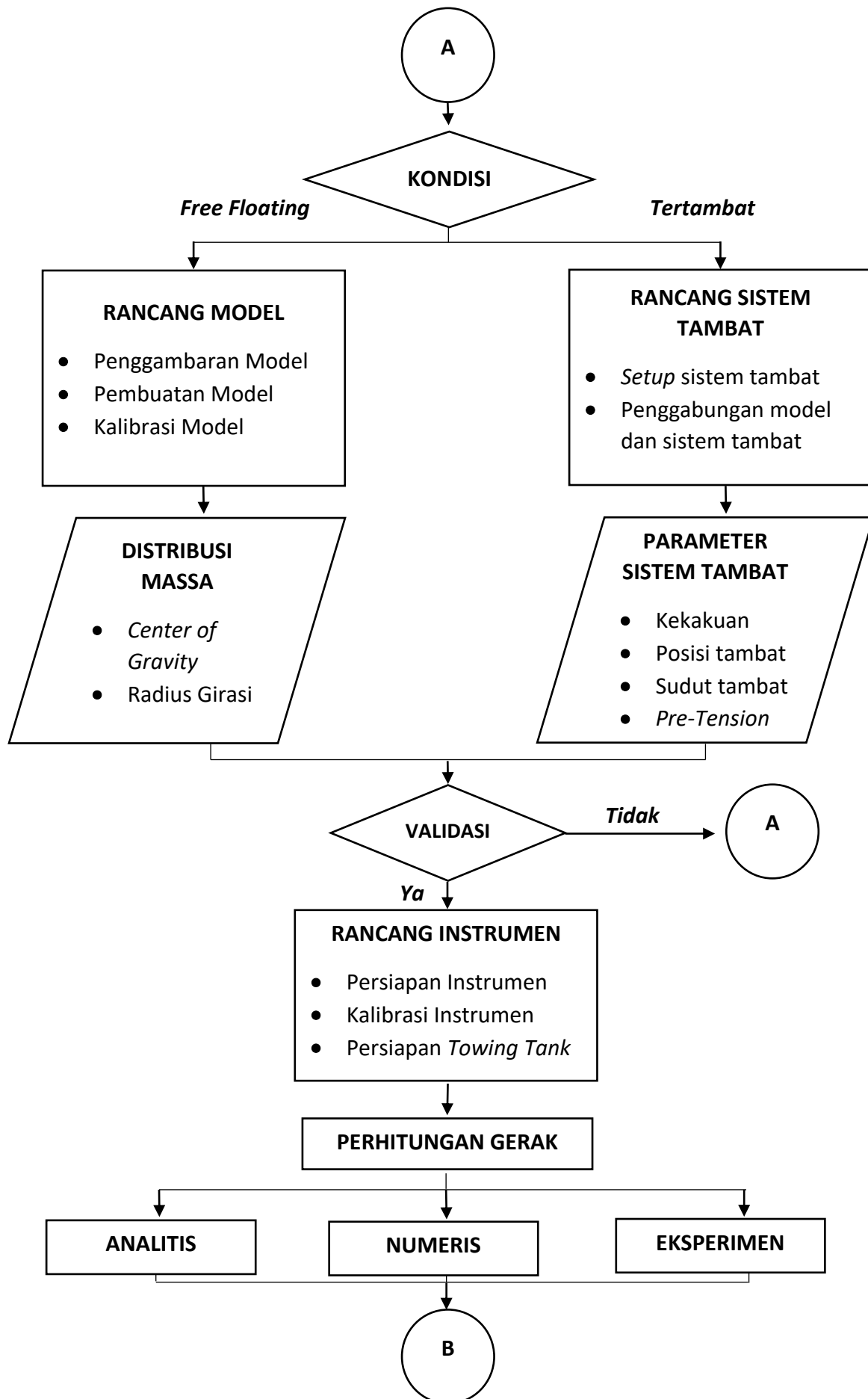
## BAB III

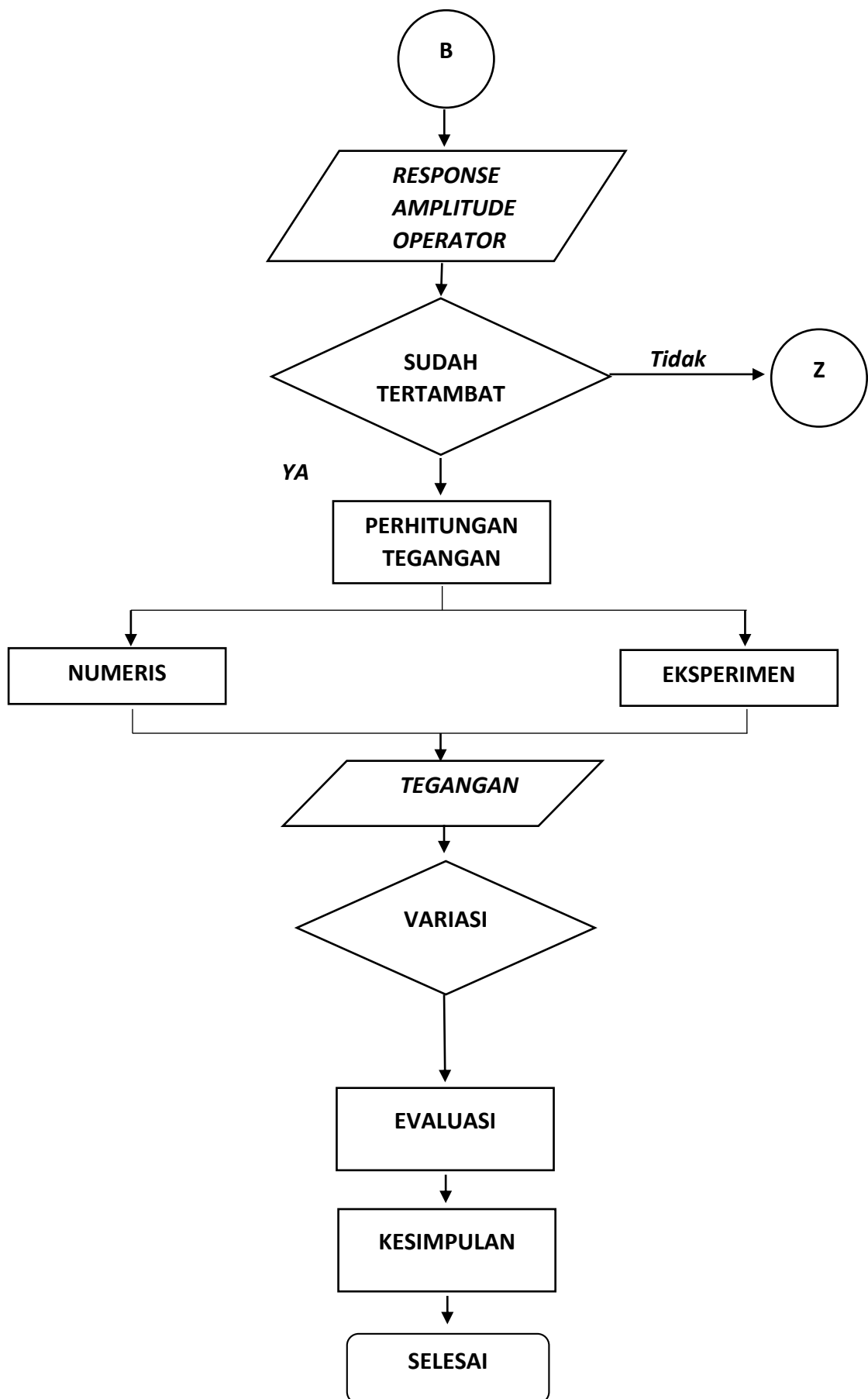
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. DIAGRAM ALIR

Proses pengerjaan tugas akhir ini akan mengikuti diagram alir sebagai berikut:







## 3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR

### 3.2.1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan studi literatur dari berbagai literasi. Literasi yang dipelajari merupakan literasi yang berhubungan dengan gelombang, interaksi gelombang dengan struktur, respon struktur akibat gelombang, sistem tambat dan interaksi sistem tambat dengan struktur. Selain itu, dalam tahap ini juga dilakukan pencarian data mengenai SPAR dan sistem tambat SPAR. Pada tugas akhir kali ini menggunakan data Mini SPAR yang terdapat pada laporan *SPAR Model Test Joint Industry Project* (1995). Table 3.1 berisi mengenai dimensi lambung, draft, posisi fairlead, dimensi dek, serta distribusi massa berupa KG (*Keel to Gravity*) dan jari-jari girasi dari Mini SPAR. Bangunan tersebut akan dianalisa dengan metode eksperimen sehingga SPAR diskala dengan ukuran tertentu untuk memenuhi kemampuan dari laboratorium Hidrodinamika FTK ITS (Tabel 3.3. Skala yang digunakan 1:125 (Tabel 3.1; 3.2)

**Tabel 3.1.** Dimensi Mini Spar

Deskripsi	MINI SPAR	
	Besaran	Satuan
<b><u>Lambung</u></b>		
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Tinggi	154.23	m
Kedalaman Posisi <i>Fairlead</i>	12.74	m
<b><u>Deck</u></b>		
Panjang	50.29	m
Lebar	50.29	m
Tinggi	19.57	m

**Tabel 3.2.** Distribusi Massa Mini Spar

Deskripsi	MINI SPAR		MODEL	
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
Massa Total	2653.15	ton	13.58	kg
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	62.02	m	49.60	cm
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	61.47	m	49.20	cm
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	61.48	m	49.20	cm

**Tabel 3.3.** Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50.00	m
Lebar	3.00	m
Kedalaman (penuh)	2.00	m
Kedalaman (operasi)	1.80	m
Temperatur	27.00	°C
Jendela Observasi ( <i>Toughned Glass</i> )	4.00	buah

### 3.2.2. Pemodelan Numeris dan Eksperimen.

Setelah dilakukan studi literature dan pengumpulan data dari dimensi SPAR, distribusi massa SPAR serta properti sistem tambat, langkah selanjutnya adalah pemodelan. Pada proses pemodelan ini akan dilakukan 2 proses pemodelan yaitu pemodelan numeris dan pemodelan eksperimental.

- Pemodelan Numeris

Pemodelan numeris dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) MOSES. Pemodelan dalam MOSES dilakukan dengan menggunakan fitur-fitur pembuat bentuk yang dimiliki MOSES. Bentuk silinder seperti SPAR dapat dimodelkan dengan memasukkan nilai diameter luar, posisi silinder dan jumlah titik pembentuk lingkaran.

- Pemodelan Eksperimen

Pemodelan eksperimen Mini SPAR diawali dengan penentuan skala dari ukuran asli ke ukuran model. Penskalaan ini mempertimbangkan aspek kesamaan geometris, kinematis dan dinamis dari sistem yang dimodelkan. Kapasitas kemampuan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS juga menjadi



pertimbangan skala yang dipakai. Selain itu, ketersediaan barang di pasaran untuk pembuatan model juga dipertimbangkan dalam penentuan nilai skala. Pada tahap kesamaan dinamis dari sistem digunakan kesamaan dalam nilai Froude sistem. Hal ini dilakukan karena pada tinjauan eksperimen kali ini hanya mempertimbangkan gaya gravitasi dan gaya inersia dari sistem.

### 3.2.3. Validasi Model

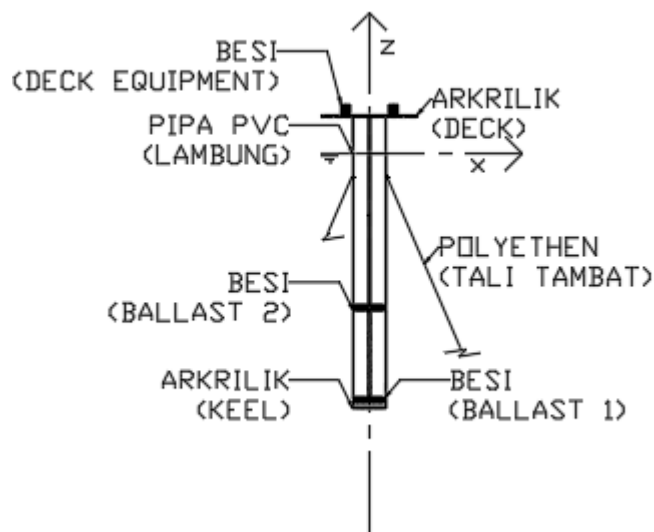
Validasi model perlu dilakukan ketika melakukan pemodelan dalam metode numeris dan eksperimen. Error yang disyaratkan agar model menjadi valid adalah 5% terhadap data. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi adalah:

- Displacement
- Posisi pusat masa (Centre of Gravity) sumbu x (LCG), sumbu y (TCG) dan sumbu z (VCG)
- Jari-jari girasi sumbu x ( $R_x$ ), sumbu y ( $R_y$ ) dan sumbu z ( $R_z$ )
- Jari-jari metacenter melintang (BMT)
- Jari-jari metacenter memanjang (BML)
- Tinggi metacenter melintang (GMT)
- Tinggi metacenter memanjang (GML)

Pada uji eksperiment kali ini data yang didapat adalah displacement, VCG,  $R_x$  dan  $R_y$  sehingga validasi hanya dilakukan pada 4 poin tersebut. Dalam metode numeris nilai-nilai tersebut dapat ditampilkan dalam MOSES.

### 3.2.4. Rancang Model

Bahan-bahan yang digunakan untuk perancangan model terdiri dari paralon, akrilik, besi pemberat (*ballasting*) dan besi ulir. Skala yang digunakan rancang model adalah dengan skala yang telah dibuat di langkah sebelumnya. Perancangan model perlu memperhatikan draft yang direncanakan yang sudah terskala dalam model. Draft ini akan menjadi pertimbangan perhitungan mengenai beban yang dibawa oleh model Mini SPAR. Besar berat tersebut juga perlu didistribusi sedemikian hingga besar jari-jari girasi terskala terpenuhi. Agar beban tersebut dapat disebar dengan mudah, maka beban akan diletakkan di besi ulir sehingga beban dapat diatur posisinya sehingga jari-jari girasi dan KG terpenuhi. Gambar 3.1 menunjukkan desain dari model Mini SPAR



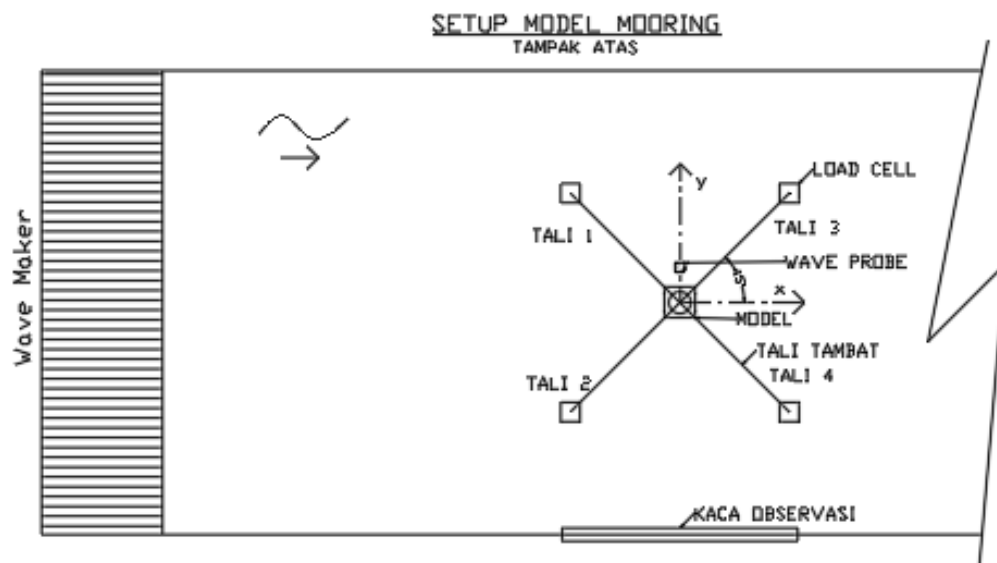
**Gambar 3.1.** Rencana Model SPAR

### 3.2.5. Kalibrasi Model

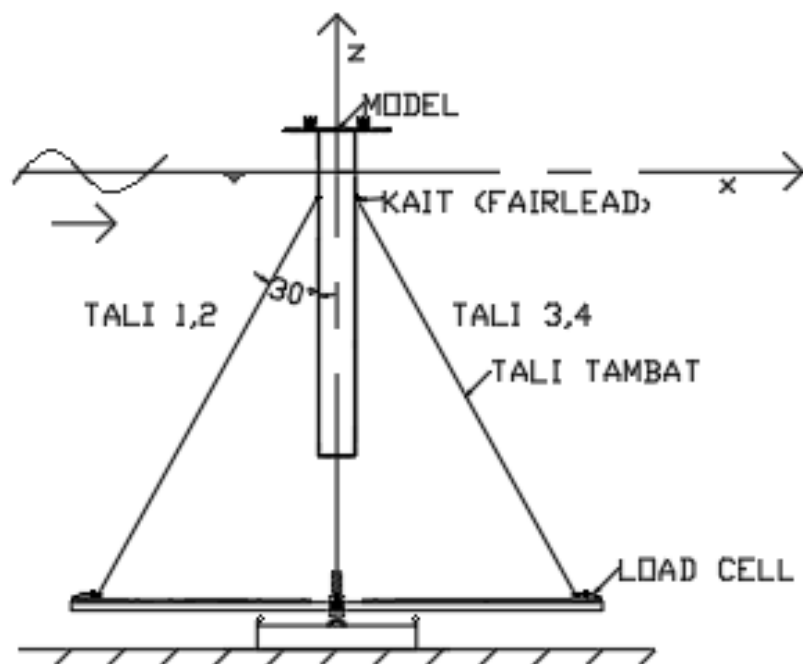
Pada model yang sudah didisain dan dibuat perlu dilakukan kalibrasi. Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan distribusi massa yang dibuat dengan distribusi massa yang diinginkan. Parameter untuk menentukan distribusi massa adalah dengan melihat letak pusat massa (*centre of gravity*) dan jari-jari girasi struktur. Selain itu kedalaman draft juga penting untuk dikalibrasi untuk melihat massa total dari model. Model akan dinyatakan valid apabila model sudah terkalibrasi dan memiliki dimensi yang sama dengan struktur terskala. Pada model kali ini akan digunakan nilai toleransi sebesar 5 persen dari nilai yang ditargetkan.

### 3.2.6. Rancang Sistem Tambat

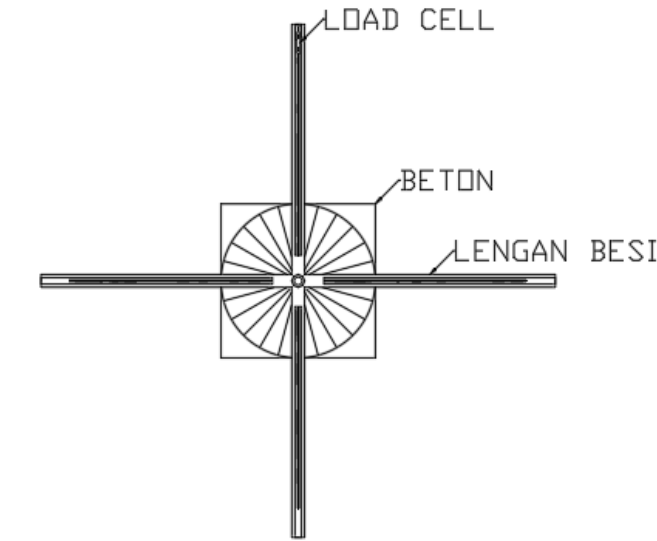
Perencanaan sistem tambat dilakukan dengan menentukan jumlah tali tambat yang dipakai, posisi *fairlead* pada model dan peletakan tali tambat pada dasar kolam (jangkar) dan. Pada tugas akhir kali ini akan digunakan 4 buah tali tambat dengan konfigurasi seperti Gambar 3.2; 3.3. Tali tambat akan disambungkan dengan model dengan menggunakan kait sebagai *fairlead*. Tali yang berasal dari *fairlead* akan disambungkan secara *taut* ke dasar kolam. Di dasar kolam terdapat konfigurasi jangkar yang terdiri dari beton, lengan dan *load cell* (Gambar 3.2). Tali tambat akan disambungkan terhadap *load cell* sehingga tegangan tali akan diukur dengan *load cell*. *Load cell* terletak di lengan jangkar.



**Gambar 3.2.** Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR



**Gambar 3.3.** Model SPAR dengan sistem tambat



**Gambar 3.4.** Rencana Sistem Jangkar

### 3.2.7. Parameter Sistem Tambat

Dalam melakukan studi eksperimen Mini SPAR, parameter sistem tambat disesuaikan dengan sistem tambat yang terdapat dalam JIP (1995). Hal yang perlu diperhatikan dalam pemodelan sistem tambat adalah kekakuan sistem tambat, posisi *fairlead*, sudut tali tambat dengan model di *fairlead* serta jenis sistem tambat yang dipakai. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.

- Kekakuan tali tambat

Pemodelan tali tambat dilakukan dengan menggunakan senar polietilene. Parameter kekakuan dari polietilene dipengaruhi oleh diameter tali, panjang tali dan material penyusun dari tali.

- Posisi *Fairlead*

*Fairlead* berfungsi untuk menyambungkan *mooring line* dengan model. Posisi tambat pada model SPAR berada diatas titik pusat massa dan berada dibawah garis air. Posisi fairlead dari model yang asli berada dikedalaman sesuai dengan Tabel 3.1.

- Sudut Tali Tambat dengan Model

Data mengenai sudut tali tambat dengan model tidak didapat pada laporan JIP (1995), namun pada tugas akhir kali ini akan digunakan sudut tali tambat dengan model sebesar 30 derajat. Hal ini dilakukan dengan

mempertimbangkan dimensi kolam uji Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.

- Jenis Sistem Tambat

Sistem tambat yang digunakan dalam studi eksperimen kali ini adalah sistem tambat *taut*.

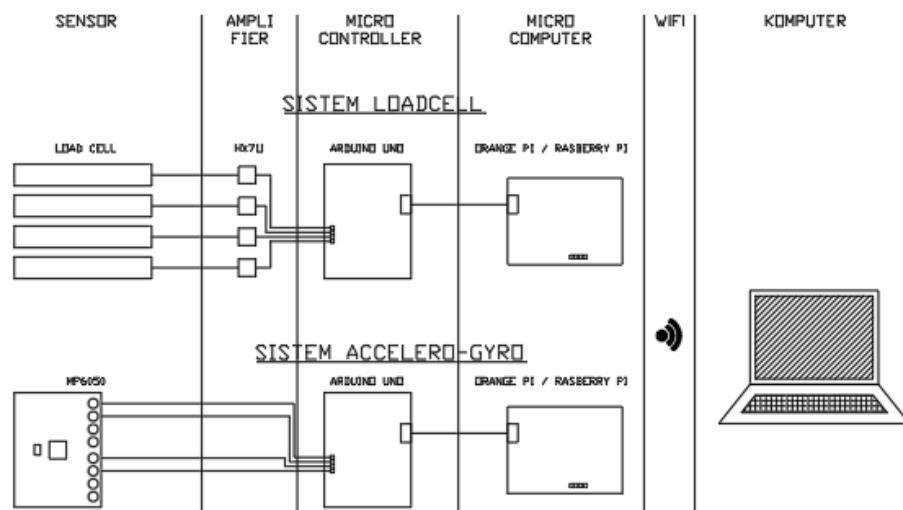
### 3.2.8. Instrumen Laboratorium

Model Mini SPAR akan diuji dengan dua kondisi, kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat. Pada kondisi terapung bebas, model akan memberikan respon berupa gerakan sedangkan pada kondisi tertambat model akan memberikan respon berupa gerakan dan tegangan tali. AcceleroGyro dan Image Processing digunakan untuk menangkap respon gerakan dari model. Image Processing mengukur displacement dari titik yang ditempelkan oleh tanda warna sedangkan AcceleroGyro mengukur percepatan gerak linear benda (percepatan *surge*, percepatan *sway*, percepatan *heave*) dan deformasi sudut. Selain itu juga terdapat opsi penggunaan image processing.



**Gambar 3.5.** Instrumen Image Processing

Pengukuran tegangan tali dilakukan dengan memanfaatkan *load cell* dengan diagram pengukuran seperti gambar 3.6. *Load cell* mengukur tegangan yang diberikan oleh tali. Perubahan tegangan tali akan menyebabkan deformasi dari *load cell*. *Load cell* yang terdeformasi akan menyebabkan strain-gauge dari loadcell memberi tegangan listrik yang berubah. Tegangan listrik yang dihasilkan loadcell akan diperbesar menggunakan amplifier yang kemudian akan didigitasi menggunakan microcontroller yang kemudian akan berubah menjadi data digital di laptop.



**Gambar 3.6.** Diagram Metodologi Umum Eksperimen Bangunan Terapung

Laboratorium yang digunakan untuk melakukan uji adalah Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Laboratorium Hidrodinamika tersebut mempunyai instrumen yang masih berfungsi dengan baik.

### 3.2.9. Metode Analitis

Dalam metode analitis, perhitungan gaya beban dilakukan dengan perhitungan gaya Froude Krylov. Gaya ini kemudian akan diolah menjadi respon gerak. Perhitungan dilakukan pada kondisi free floating dan kondisi tertambat. Perhitungan gerak hanya dibatasi untuk melakukan perhitungan di mode gerak *surge*, *heave* dan *pitch*. Output dari perhitungan gerak secara analitik adalah diagram RAO untuk *surge*, *heave* dan *pitch* baik dalam kondisi terapung bebas atau tertambat

### 3.2.10. Metode Numeris

Metode numeris analisa gerak dan dinamika tegangan tali model dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES. Output yang diharapkan dengan metode numeris adalah RAO kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat serta Tension Response Operator. MOSES mempunyai fitur penyelesaian numeris dengan menggunakan metode panel 3D Diffraction. Tahapan perhitungan RAO dengan menggunakan perangkat lunak MOSES adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan Mini SPAR dilakukan dengan membuat model dengan fitur membuat lambung berjenis silinder. Ukuran diameter beserta tinggi dari model diinputkan ke dalam MOSES. Skrip pembuatan model dilakukan

dengan ekstensi file berjenis .dat. Pada pemodelan ini juga diset agar model diselesaikan dengan metode 3D Diffraction.

2. Setelah pembuatan ekstensi file berjenis .dat, ekstensi file berjenis .cif perlu dibuat. File ini berisi perintah operasi dari model yang sudah dibuat di file .dat. Langkah pertama yang dilakukan dari perintah .cif adalah set kondisi draft bangunan terapung.
3. Pada langkah selanjutnya, distribusi massa dari struktur dimasukkan dalam skrip .cif. Distribusi masa dimasukkan dalam bentuk jari-jari girasi dan letak pusat massa.
4. Setelah menyelesaikan parameter distribusi benda, perintah mengenai parameter gelombang yang digunakan dalam analisa berbasis frekuensi dilakukan. Gaya hidrodinamika dari gelombang akan dihitung berdasarkan rentang periode yang sudah diset tersebut. Rentang gelombang ini berada di rentang gelombang laut sebesar 3-20 detik. Selain periode gelombang, arah datang gelombang juga dimasukkan di sini. Pada tugas akhir ini akan digunakan 3 arah gelombang datang.
5. MOSES nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan *free floating* untuk tiap gerakan translasi (*surge, sway, heave*) dan rotasi (*roll, pitch, yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.
6. Dalam melakukan analisa sistem tertambat, model diberi tambahan tali tambat. Tali tambat akan disambungkan dengan fairlead sebagai penghubung bangunan. MOSES juga mempunyai fitur untuk pengaturan posisi jangkar sekaligus pengaturan pre tension. Perintah ini dilakukan dengan menggunakan menu MEDIT di ekstensi file .cif.
7. Dengan kondisi mooring yang terpasanng, MOSES akan memberi output RAO ketika keadaan tertambat. Selain output RAO gerak, *tension operator* juga dapat dihasilkan dari perhitungan MOSES.
8. Analisa numeris dilakukan untuk 3 arah gelombang datang sebesar  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  dan  $45^\circ$

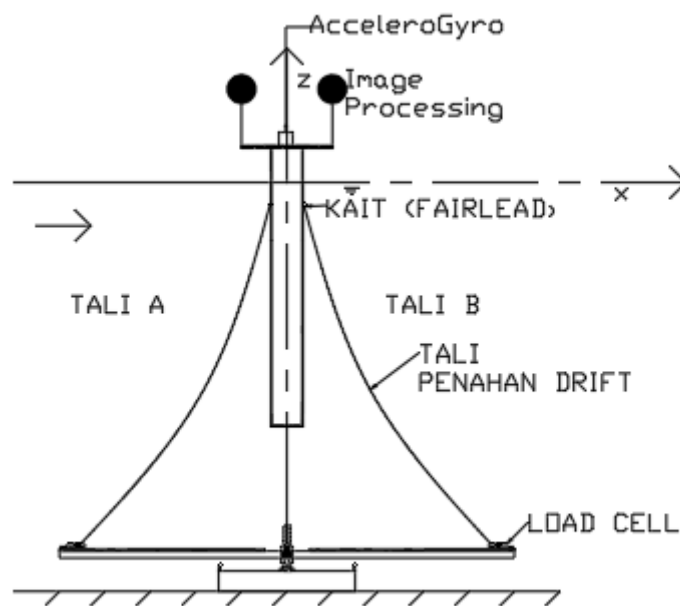
### 3.2.11. Metode Eksperimen

Analisa Eksperimen dari model dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Dalam metode eksperimen, SPAR akan diteliti dalam kondisi terapung bebas dan tertambat. Pada kondisi terapung bebas, olah gerak SPAR akan ditinjau dengan 1 arah gelombang datang ( $0^\circ$ ). Sedangkan, pada kondisi tertambat akan ditinjau olah gerak SPAR sekaligus tegangan tali dengan 1 arah gelombang datang ( $0^\circ$ ). Output dari metode eksperimen merupakan RAO gerak kondisi terapung bebas, RAO gerak kondisi tertambat sekaligus Tension Operator (Operator Tegangan Tali).

Konfigurasi terapung bebas dapat dilihat pada Gambar 3.7. Sedangkan, dalam kondisi tertambang alat yang dibutuhkan adalah instrument pengukur gerak (Image Processing dan Accelerogyro), instrument pengukur tegangan tali tambat (*load cell*) dan model. Konfigurasi kondisi tertambat dapat dilihat di Gambar 3.9. Berikut merupakan langkah-langkah untuk model terapung bebas (*free floating*)

1. Model yang sudah terkalibrasi disiapkan berada di dalam kolam. Melakukan proses kalibrasi alat, baik untuk Image Processing maupun Accelerogyro
2. Image Processing dilakukan dengan webcam yang tersambung di perangkat komputer yang sudah terinstall program pembacaan gerak.
3. Accelerogyro diletakkan di deck dari strukur. Accelerogyro ini kemudian akan dihubungkan dengan sistem elektronika sehingga dapat terbaca di komputer.
4. Tali penahan drift berupa tali (*loose rope*) dihubungkan di *fairlead* model ke jangkar. Tali tersebut berfungsi untuk menahan gerak drift dari struktur akibat efek orde 2 gelombang. Agar tidak mempengaruhi gerak bangunan dalam kondisi *free floating* tali ini harus dipasang dengan tanpa tegangan (*loose*).





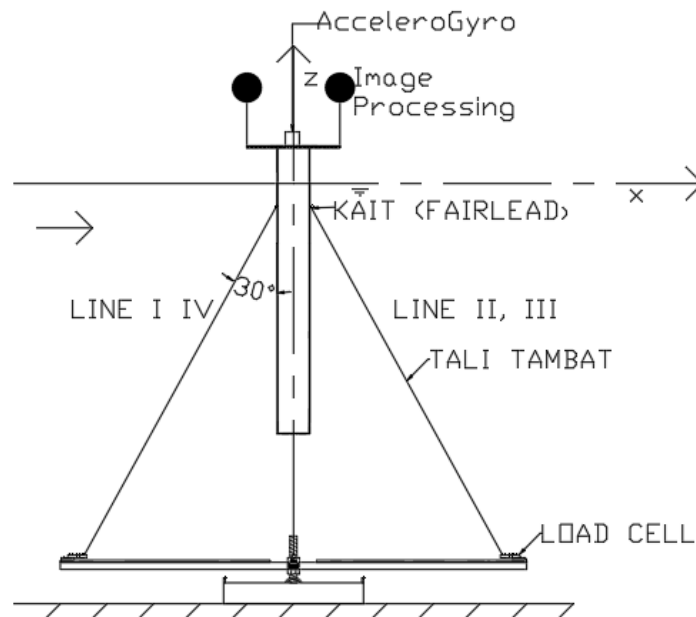
**Gambar 3.7.** *Setup model tanpa tali tambat (free floating)*

5. Selama proses pemasangan model, permukaan diusahakan agar tenang.
6. Kamera perekam juga perlu dipasang sebagai dokumentasi serta dapat dijadikan bahan evaluasi.
7. Kemudian dilakukan evaluasi apakah model sudah berada di lokasi yang direncanakan atau belum dan pastikan juga air dalam towing tank sudah cukup tenang untuk dilakukan run gelombang.
8. Setelah semua dipastikan sesuai dengan syarat uji run gelombang maka eksperimen dapat dimulai. Jika belum sesuai, maka perlu dilakukan setup ulang.
9. Uji run gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Periode gelombang akan disesuaikan dengan periode laboratorium Hidrodinamika FTK ITS Surabaya

#### Run model dengan tali tambat (*mooring*)

Pada eksperimen dengan tali tambat, jangkar dihubungkan dengan tali tambat dengan *fairlead* dari model. Eksperimen model dengan tali tambat ini memiliki langkah yang hampir sama dengan tanpa tali tambat. Pada eksperimen dengan adanya tali tambat, instrumen tambahan berupa *load cell* ditambahkan pada sistem.

1. Jangkar ditaruh di dasar kolam. Kemudian *load cell* yang sudah dikalibrasi diletakkan pada posisi sedemikian hingga sudut antara tali tambat dengan *fairlead* sebesar  $30^\circ$ .
2. Pengaturan posisi jangkar dengan menggerakkan *load cell* mendekati atau menjauhi model struktur.
3. Tali tambat diatur sedemikian hingga mempunyai konfigurasi *taut*.



**Gambar 3.8.** *Setup* model dengan tali tambat (*mooring*)

4. Dilakukan evaluasi apakah *setup* model sudah sesuai dengan rencana atau belum. Jika belum sesuai dengan rencana penelitian maka perlu dilakukan *setup* kembali. Jika sudah sesuai dengan rencana, maka eksperimen dapat dimulai.
5. Selama eksperimen output dari *load cell* dan AcceleroGyro akan diamati untuk perhitungan gerak struktur dan tegangan tali
6. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Pada saat *running* perlu diperhatikan dan diukur sejauh apa gerakan model dan seberapa besar tegangan tali tambat yang terjadi.

### 3.3. TIMELINE

Proses penelitian ini akan berlangsung selama 5 bulan dengan rincian sebagai berikut:

No	Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV				Bulan V			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data																				
2	Permodelan Eksperimen Persiapan Model Fisik																				
3	Permodelan Numerik																				
4	Rancang Model dan Sistem Tambat																				
5	Rancang Instrumen																				
6	Perhitungan Gerak																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
7	Perhitungan Tegangan																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
8	Penyusunan Laporan																				

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

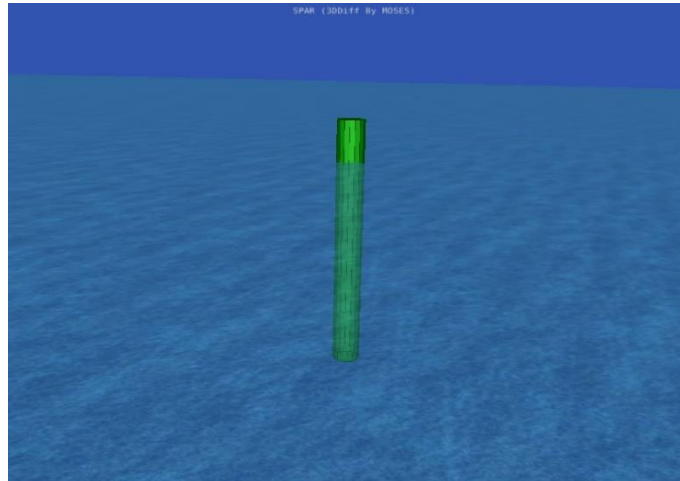
#### 4.1. PEMODELAN STRUKTUR

##### 4.1.1. Pemodelan Numerik

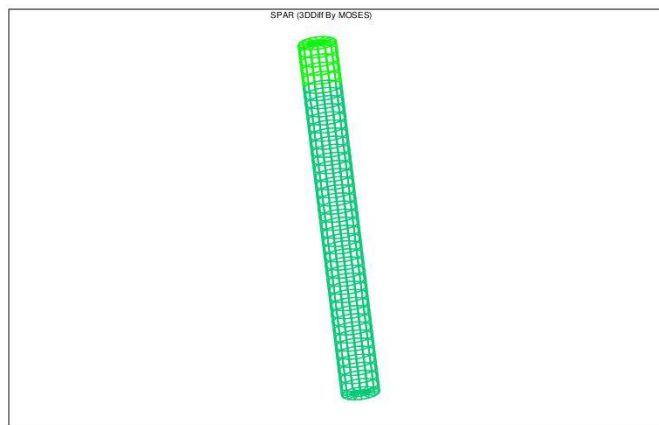
Perhitungan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES Editor 7. Langkah yang perlu dilakukan adalah memberi perintah membuat lingkaran di file ekstensi .dat MOSES (LAMPIRAN A). Tabel 4.1 menampilkan dimensi dari SPAR yang digunakan untuk pemodelan numerik. Data SPAR diambil dari Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995). Model yang dibuat di MOSES di-*meshing* dengan ukuran *panel* maksimal sebesar 3.5 m. Model numerik yang sudah di-*meshing* terlihat di Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.

**Tabel 4.1.** Data dimensi struktur SPAR. (Deep Oil Technology Inc, 1995)

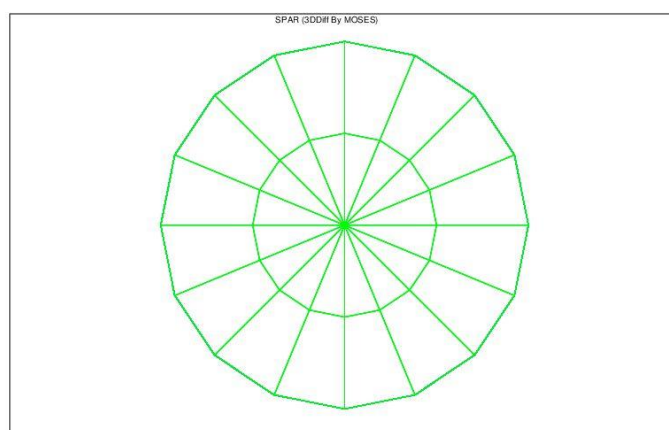
Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Tinggi	154.23	m
Posisi <i>Fairlead</i>	12.74	m
Panjang deck	50.29	m
Lebar deck	50.29	m



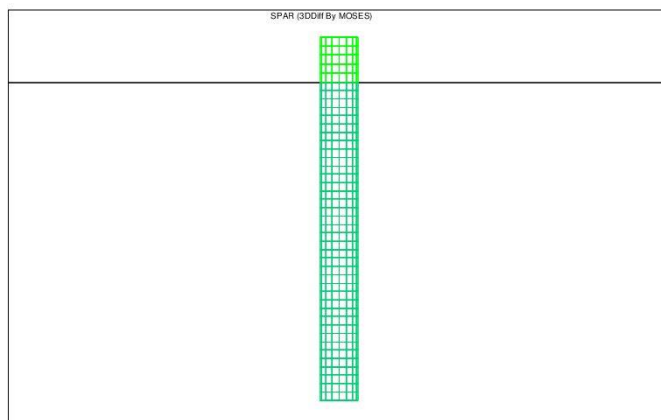
**Gambar 4.1.** Tampak isometri model numerik



**Gambar 4.2.** Tampak isometri model numerik dengan meshing



**Gambar 4.3.** Tampak atas model numerik dengan *meshing*



**Gambar 4.4.** Tampak depan model numerik dengan *meshing*

Pemodelan dengan menggunakan MOSES juga dilakukan dengan memasukan sarat dan jari-jari girasi. Bagian struktur (Gambar 4.2 dan 4.4) yang berwarna hijau tua menunjukkan bagian di bawah air, sedangkan yang berwarna hijau muda merupakan bagian tidak di atas air. Jari-jari girasi SPAR dimasukkan ke dalam MOSES sesuai dengan Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Distribusi massa SPAR. (Deep Oil Technology Inc, 1995)

Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Massa Total	2653.15	Ton
<i>Keel to Gravity (KG)</i>	62.02	m
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	61.47	m
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	61.47	m

#### 4.1.2. Pemodelan Eksperimen

Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude sesuai Tabel 4.3. Pipa PVC digunakan sebagai lambung, akrilik sebagai geladak dan kait sebagai *fairlead*. Perakitan model dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Pipa PVC 5” digunakan untuk menyesuaikan ukuran diameter dari model. Pipa tersebut kemudian dipotong sesuai dengan tinggi lambung. Bagian bawah dari pipa PVC ditutup dengan akrilik. Akrilik pada bagian bawah ditempel ke pipa PVC menggunakan lem lalu diberi dempul untuk menghindari kebocoran. Untuk

memastikan tidak adanya kebocoran pada model, dilakukan tes terapung selama 24 jam di *towing tank*.

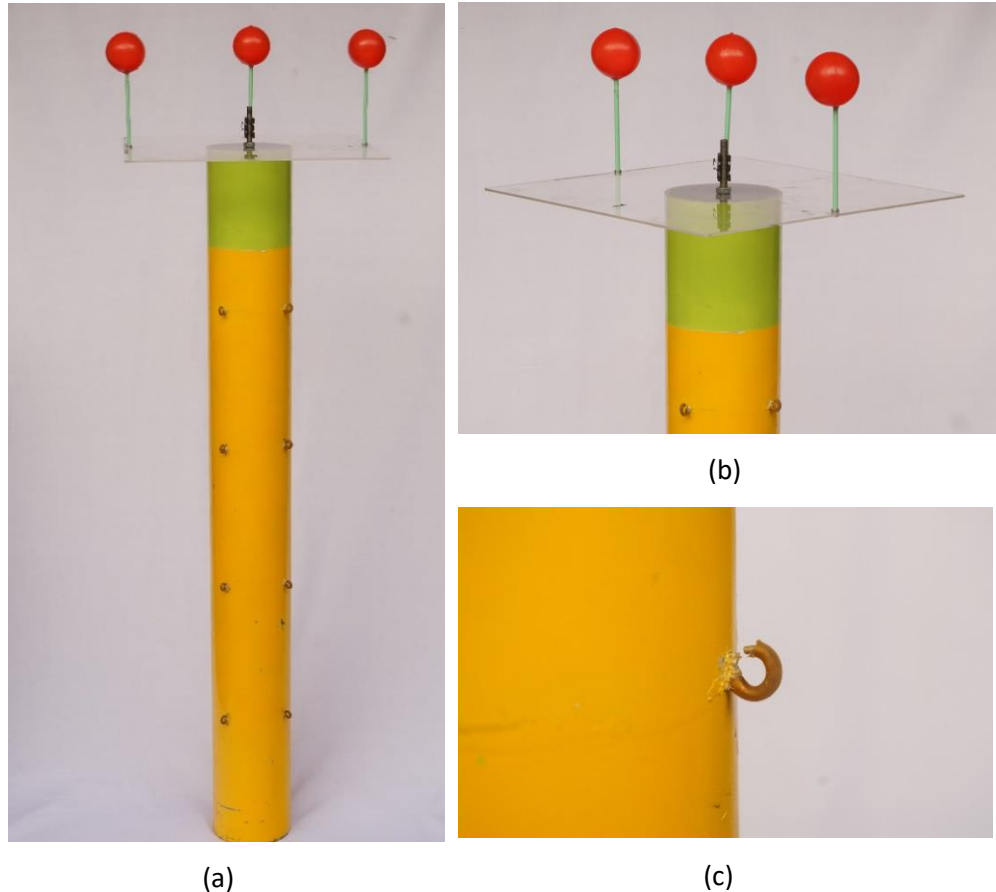
**Tabel 4.3.** Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Fraude

	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	2653152.4910	$\lambda^3$	13.584
Diameter (m)	16.000	$\lambda$	0.128
Draft (m)	135.010	$\lambda$	1.080
Panjang (m)	154.210	$\lambda$	1.234
KG (m)	62.022	$\lambda$	0.496
Radius girasi <i>pitch</i> (m)	61.470	$\lambda$	0.492
Radius girasi <i>roll</i> (m)	61.470	$\lambda$	0.492
Periode gelombang (s)	40, 35, 30, 25, 20, 10, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 3.1, 2.7, 2.2, 1.8, 0.9, 0.5

Setelah dimensi utama dari model fisik sudah terpenuhi, distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.2. Di dalam lambung model fisik diberi besi ulir dan silinder untuk untuk mengatur distribusi beban dari model fisik dapat dilihat pada Gambar 4.5. Model yang sudah jadi kemudian dicat dengan warna kuning dan hijau bertujuan agar warna model kontras dengan warna air seperti Gambar 4.6.



**Gambar 4.5.** Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik



**Gambar 4.6.** Tampak depan model fisik (a), Tampak geladak (b) dan *Fairlead* model (c)

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total yang digunakan material model.

Setiap material model yang dipakai ditimbang untuk mendapatkan massa total dari struktur. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, hasil pengukuran didapat pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Hasil pengukuran berat material

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46



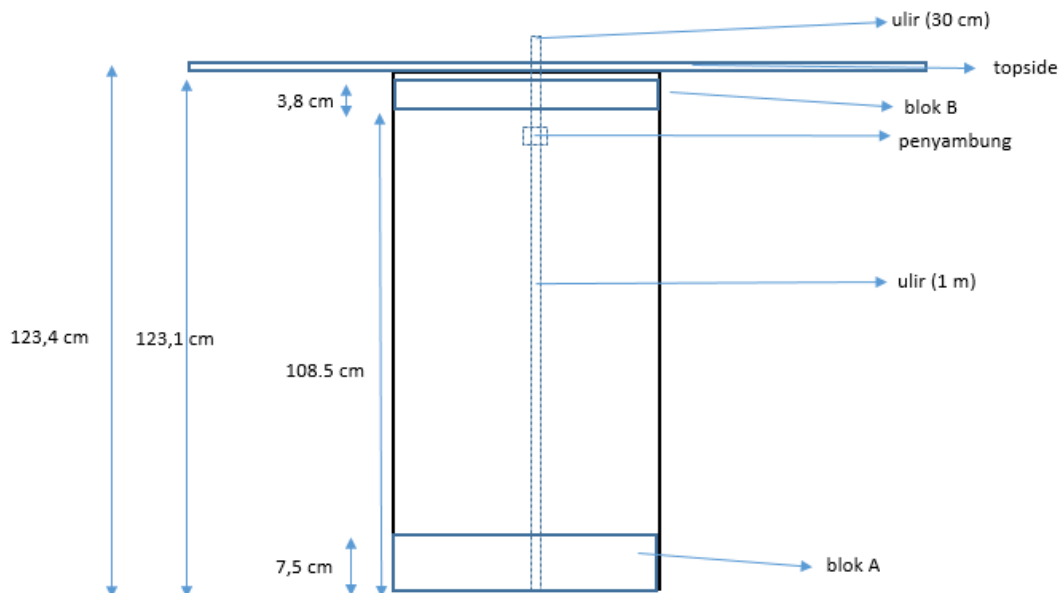
**Tabel 4.4.** Hasil pengukuran berat material (lanjutan)

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok B	Ballast 5	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 6	0.8	466.00	1	466.00
	Ballast 7	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0
	Mur	-		2	0
Total					13838.01

2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Setiap material yang dipakai dihitung momen inersia massanya. Momen inersia massa masing-masing material kemudian digabungkan untuk dicari momen inersia massa total. Momen inersia massa total yang didapat akan dihitung menjadi jari-jari girasi model fisik.

Momen inersia massa dari material tergantung pada masa benda dan bentuk material. Untuk mempermudah perhitungan, model dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya pipa PVC, blok A, blok B, topside dan ulir.



**Gambar 4.7.** Desain pemberat dan ulir

Perhitungan dari setiap blok adalah:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan *roll*,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $r$  merupakan jari-jari silinder dan  $l$  merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Pipa PVC mempunyai ukuran massa 4088 g, diameter 12.8 cm dan panjang 123.4 cm. Tabel 4.5 menampilkan hasil perhitungan momen inersia masa dari PVC (Silinder berrongga).

**Tabel 4.5.** Perhitungan momen inersia massa Pipa PVC

	<b>Berat (g)</b>	<b><math>I_{ox}</math> (g.cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>I_{oy}</math> (g.cm<sup>2</sup>)</b>
Paralon	4087.53	5287070.0	5287070.0

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan *roll*,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $r$  merupakan jari-jari silinder dan  $l$  merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Blok A terdiri dari pemberat berbahan besi dan *cap* berbahan akrilik. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok A terlampir di Tabel 4.6.

**Tabel 4.6.** Perhitungan momen inersia massa Blok A

<b>Komponen</b>	<b>Berat (g)</b>	<b><math>I_{ox}</math> (g.cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>I_{oy}</math> (g.cm<sup>2</sup>)</b>
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32
Ballast 1	1628.49	16446.05	16446.05
Ballast 2	1623.09	16391.52	16391.52
Ballast 3	2094.09	20624.60	20624.60

**Tabel 4.6.** Perhitungan momen inersia massa Blok A (lanjutan)

Komponen	Berat (g)	$I_{ox}$ (g.cm <sup>2</sup> )	$I_{oy}$ (g.cm <sup>2</sup> )
Ballast 4	663.59	6825.99	6825.99

c. Blok B

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (persamaan 4.2).

Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

**Tabel 4.7.** Perhitungan momen inersia massa Blok B

Komponen	Berat (g)	$I_{ox}$ (g.cm <sup>2</sup> )	$I_{oy}$ (g.cm <sup>2</sup> )
Silinder pejal 5	2096.7	20748.49	20748.49
Silinder pejal 6	465.99	4556.90	4556.90
Silinder pejal 7	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

*Topside* terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya dengan  $I_{ox}$  merupakan momen inersia massa gerakan *roll*,  $I_{oy}$  merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*,  $m$  merupakan masa benda,  $p$  merupakan panjang balok,  $l$  merupakan lebar balok dan  $t$  merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Hasil perhitungan momen inersia massa dari *topside* ditampilkan dalam Tabel 4.8.

**Tabel 4.8.** Perhitungan momen inersia massa *topside*

Komponen	Berat (g)	$I_{ox}$ (g.cm <sup>2</sup> )	$I_{oy}$ (g.cm <sup>2</sup> )
Deck	599.5	79937.8	79937.8

e. Ulir

Pemberat akan dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang terbuat dari besi yang mempunyai panjang 1.3 m dengan diameter 8 mm. Karena berbentuk silinder pejal maka Persamaan 4.2 dipakai untuk menghitung momen inersia masa dari ulir. Hasil perhitungan momen inersia massa dari ulir ditampilkan dalam Tabel 4.9.

**Tabel 4.9.** Perhitungan momen inersia massa ulir

Komponen	Berat (g)	I <sub>ox</sub> (g.cm <sup>2</sup> )	I <sub>oy</sub> (g.cm <sup>2</sup> )
Ulir	352.09	495873.99	495873.99

Setelah momen inersia massa dari setiap material diketahui, perhitungan momen inersia massa total terhadap pusat masa dilakukan. Langkah pertama untuk mencari momen inersia total tersebut adalah dengan mencari pusat masa dari benda terlebih dahulu. Tabel 4.10 menunjukkan posisi material dengan sumbu 0 di x (centerline), y (midship) dan z (keel). Tabulasi perhitungan pusat masa dapat dilihat di LAMPIRAN B. Tabel 4.11 merupakan hasil perhitungan pusat masa model.

**Tabel 4.10.** Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
<b>Blok A</b>	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	<b>Ballast 1</b>	1628.5	0.00	0.00	6.50
	<b>Ballast 2</b>	1623.1	0.00	0.00	4.50
	<b>Ballast 3</b>	2094.1	0.00	0.00	3.0
	<b>Ballast 4</b>	663.59	0.00	0.00	1.25
<b>Blok B</b>	<b>Ballast 5</b>	2096.7	0.00	0.00	109.75
	<b>Ballast 6</b>	465.99	0.00	0.00	111.40
	<b>Ballast 7</b>	179.49	0.00	0.00	112.05
<b>Tambahan</b>	<b>Topside</b>	599.50	0.00	0.00	123.55
	<b>Ulir (130 cm)</b>	352.09	0.00	0.00	65.30
<b>PVC</b>	<b>PVC</b>	4087.5	0.00	0.00	61.70
	<b>Total</b>	13838.0131			

**Tabel 4.11.** Pusat massa model

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.01

Setelah pusat massa dari model diketahui, momen inersia massa relatif terhadap pusat masa dapat dicari. Tabulasi dari perhitungan momen inersia massa terhadap pusat masa terdapat di LAMPIRAN B. Jari-jari girasi dapat dicari dengan momen inersia masa yang diketahui, sesuai dengan persamaan 4.4. Tabel 4.12 menampilkan hasil jari-jari girasi dari model.

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

**Tabel 4.12.** Jari-jari girasi model

<i>Rxx</i> (cm)	<i>Ryy</i> (cm)
48.47	48.47

Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 merupakan nilai target dari pusat massa dan jari-jari girasi dari model fisik. Setelah model dibuat, nilai-nilai tersebut perlu divalidasi pada model yang sudah jadi. Tabel 4.13 di bawah ini merupakan perbandingan dari distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.

**Tabel 4.13.** Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan

Deskripsi	Model Fisik		Hasil Perhitungan		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	kg	13.838	kg	1.89 %
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	49.6	cm	49.01	cm	1.19%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%

## 4.2. PEMODELAN TALI TAMBAT

Tali tambat yang digunakan dalam studi eksperimen ini mengacu pada tali tambat pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain yang digunakan dalam industri lepas pantai. Pada studi eksperimen ini, data tali tambat yang dijadikan acuan adalah data kekakuan *wire rope*. Tali kemudian akan dimodelkan dengan tali nilon seperti Gambar 4.8.

Dari data di Gambar 4.9, properties *wire rope* yang digunakan adalah *wire rope* dengan kekakuan sebesar 1175 MN. Properties dari *wire rope* yang digunakan dijelaskan pada Tabel 4.14.

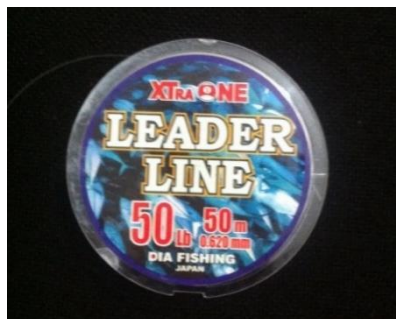
**Tabel 4.14.** Properti mooring line wire rope

<b>Diameter</b>	115	mm
<b>Masa jenis (udara)</b>	65	kg/m
<b>Masa jenis (air)</b>	55	kg/m
<b>MBF</b>	11760	kN
<b>Kekakuan</b>	1175	MN

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Properti tali nylon yang digunakan dilampirkan pada Tabel 4.15

**Tabel 4.15.** Spesifikasi tali tambat eksperimen

<b>Keterangan</b>	<b>Simbol</b>	<b>Model (Tali Nilon)</b>	<b>Satuan</b>
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m <sup>2</sup>
Diameter tali	D	0,62	mm
Luas Tali	A	0,3019	mm <sup>2</sup>
Panjang Tali	L	1,8	m



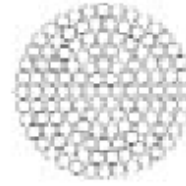
**Gambar 4.8.** Bahan tali tambat

## WIRE ROPE

### ROPE SPECIFICATIONS

#### SPIRAL STRAND

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations  
Wear design calculation - Corrosion design calculation



4.34

Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm <sup>2</sup>	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

**Gambar 4.9.** Katalog properties *wire rope*

Kemudian, penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing sesuai dengan skala model untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan di full scale model. Skala model yang digunakan adalah 1:125, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat model fisik dijelaskan pada Tabel 4.16.

**Tabel 4.16.** Spesifikasi tali tambat model fisik

Keterangan	Simbol	Model (Tali Nilon)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m <sup>2</sup>
Diameter tali	D	77,50	mm
Luas Tali	A	4717,30	mm <sup>2</sup>
Panjang Tali	L	225	m

Dari Tabel 4.16 di atas, kekakuan tali dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$K = E \times A$$

$$K = 250.000 \text{ MN/m}^2 \times 0,00472 \text{ m}^2$$

$$K = 1.179,32 \text{ MN}$$
(4.5)

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Perbandingan keduanya terlampir pada Tabel 4.17.

**Tabel 4.17.** Perbandingan kekakuan *prototype* dengan data kekakuan *wire rope* acuan

<b>Stiffness model asli (MN)</b>	<b>Stiffness wire rope acuan (MN)</b>	<b>Error (%)</b>
1179,32	1175	0,37

Dari perbandingan kekakuan pada Tabel 4.17, didapatkan persentase error yang terjadi sebesar 0,368 % memenuhi syarat dari validasi (<5%). Sehingga untuk analisa eksperimen, numerik dan analitis data properties tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4.18.

**Tabel 4.18.** Data properties tali tambat yang digunakan pada model fisik

	<b>Model fisik</b>	<b>Prototype</b>	<b>Satuan</b>
<b>Length</b>	1,8	225	m
<b>Diameter</b>	0,62	115	mm
<b>Axial Stiffness (EA)</b>	603,814	1,175,000,000	N
<b>MBF</b>	222,41	11,760,000	N

### 4.3. VALIDASI MODEL

#### 4.3.1. Validasi Model Numerik

Model yang dibuat di MOSES dapat dilihat parameter hidrostatiknya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisa. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.19 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data. Berdasar Tabel 4.19 maka model numerik yang dibuat di MOSES bisa dilanjutkan untuk analisa gerak dan tali tambat.



**Tabel 4.19.** Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

	<b>Prototype</b>		<b>Model Numerik</b>		<b>Error (%)</b>
<b>Diameter</b>	16.00	m	16.00	m	0.00
<b>Draft</b>	135.03	m	135.03	m	0.00
<b>Length</b>	154.23	m	154.23	m	0.00
<b>Fairlead depth</b>	12.74	m	12.74	m	0.00
<b>Weight</b>	26531524.91	kg	27117650	kg	2.21
<b>KG</b>	62.03	m	62.03	m	0.00
<b>Roll Gyration</b>	61.48	m	61.48	m	0.00
<b>Pitch Gyration</b>	61.48	m	61.48	m	0.00
<b>Mooring Diameter</b>			115	mm	
<b>Mooring Stiffness (EA)</b>			1175	MN	

#### 4.3.2. Validasi Model Eksperimen

Setelah melakukan proses perencanaan, model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi. Validasi diperlukan karena pada pembuatan, selain material utama yang dipakai, pada model juga terdapat material pendukung seperti lem, dempul, resin dan sebagainya. Proses ini dilakukan sebagai berikut:

##### 1. Massa Total

Perhitungan massa total dilakukan dengan melihat sarat yang dimiliki struktur ketika keadaan terapung. Berdasar pengamatan yang didapat sarat model fisik sesuai dengan Tabel 4.20. Dengan sarat dan diameter lambung yang diketahui, maka berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat displacement model sesuai Tabel 4.20.

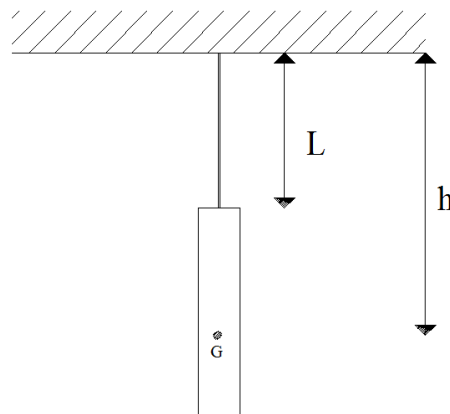
**Tabel 4.20.** Sarat dan displacement model fisik

<b>Sarat Model fisik</b>	108.5	cm
<b>Displacement Model</b>	13.90	kg

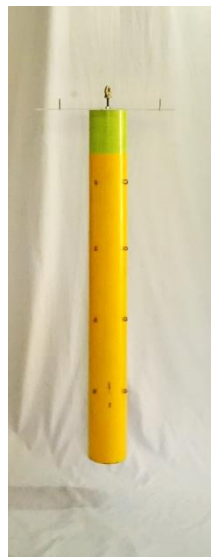
##### 2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan,

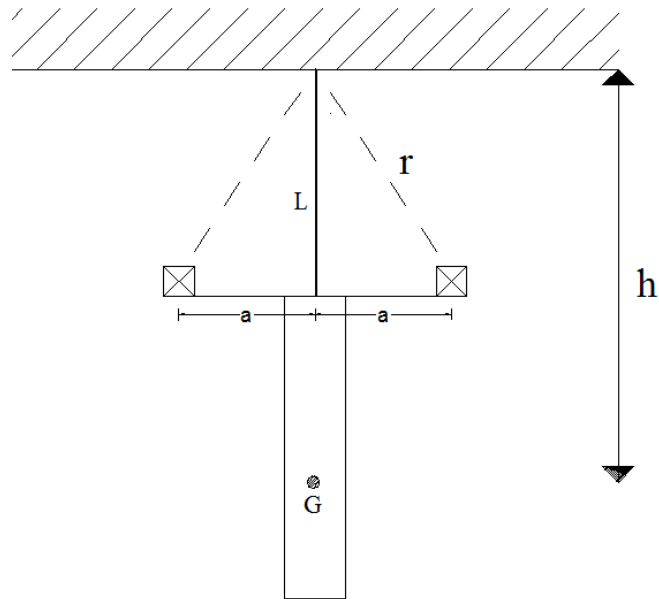
sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat pada jarak tertentu. Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada Tabel 4.21.



**Gambar 4.10.** Bahan tali tambat skenario tes pendulum kondisi 1 untuk perhitungan jari-jari girasi



**Gambar 4.11.** Tes pendulum kondisi 1



**Gambar 4.12.** Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi



**Gambar 4.13.** Tes pendulum kondisi 2

**Tabel 4.21.** Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test

NO.	BESARAN	BESAR	SATUAN
1.	Berat Model (m)	13.90	kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s <sup>2</sup>
3.	Jarak massa tambah (a)	0.153	m (dari titik pusat model)

**Tabel 4.21.** Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test (lanjutan)

NO.	BESARAN	BESAR	SATUAN
4.	Berat massa tambah (m)	1.52	kg
5.	Panjang tali (L)	2.36	m
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.37	m

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Hasil pengukuran dari periode gerak pendulum model fisik pada kondisi 1 dan kondisi 2 disajikan dalam LAMPIRAN C. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.22.

**Tabel 4.22.** Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah ( $T_0$ )	3.502	detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah ( $T_1$ )	3.540	detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah ( $\omega_0$ )	1.794	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah ( $\omega_1$ )	1.775	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.23 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.6.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_0^2}\right)^2\right]Mg} \quad (4.6)$$

$$h = 2.964 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

$$KG = h - l - \text{panjang ulir sisa} - \text{tali pengait di ulir}$$

$$KG = 296.4 - 236 - (130-123.4) - 3.8$$

$$KG = 50.25 \text{ cm dari keel}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.7.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_0^2} \quad (4.7)$$

$$I_{44} = I_{55} = 125.58 \text{ kg.m}^2$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.8.

$$I_m = I - mh^2$$

$$I_m = 3.47 \text{ kgm}^2 \quad (4.8)$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.9. Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.993 cm.

$$\text{Radius girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}}$$

$$\text{Radius girasi} = 0.4993 \text{ m} \quad (4.9)$$

Tabel 4.23 menunjukkan perbandingan parameter model antara prototype, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

**Tabel 4.23.** Validasi model fisik

	Data		Konversi	Target		Achieved		Error
Diameter	16.00	m	125	12.80	cm	12.80	cm	0.0%
Draft	135.03	m	125	108.00	cm	108.00	cm	0.0%
Length	154.23	m	125	123.4	cm	123.40	cm	0.0%
Fairlead Depth	12.74	m	125	10.2	cm	10.20	cm	0.0%
Weight	26531524.91	kg	1953125	13.58	kg	13.90	kg	2.35%
KG	62.03	m	125	49.6	cm	50.25	cm	1.31%
<i>Roll</i> Gyrasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
<i>Pitch</i> Girasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
Mooring								
Diameter	-					0.62	mm	-
EA (Stiffness)						1175	MN	-

#### 4.4. INSTRUMEN PENGUKURAN

Pada studi eksperimen diperlukan instrumen untuk mengukur gerak dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak menggunakan *gyroscope* dan

*image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran, ketiga instrumen ini perlu dilakukan kalibrasi.

#### **4.4.1. Kalibrasi Gyroscope**

Gerak rotasional sumbu y (*pitch*) dari model SPAR diukur menggunakan *gyroscope*. Instrumen *gyroscope* yang digunakan adalah *gyroscope* MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengukur sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka-angka digital.

Instrumen *gyroscope* (Gambar 4.14) diletakkan pada bagian geladak (Gambar 4.15) pada model fisik yang berbentuk persegi dengan bahan akrilik.



**Gambar 4.14.** Instrumen *gyroscope*



**Gambar 4.15.** Geladak dan busur

Gerakan *pitch* dari SPAR diukur dengan menggunakan *gyroscope*. Untuk program pembacaan *gyroscope* menggunakan *library* yang tersedia di internet dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini menghasilkan keluaran berupa angka-angka dengan format sebagai berikut:

DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <FILTERED YAW>, <PITCH>, <FILTERED PITCH>, <ROLL>, <FILTERED ROLL>, <LC1>, <LC2>, <LC3>, <LC4>.

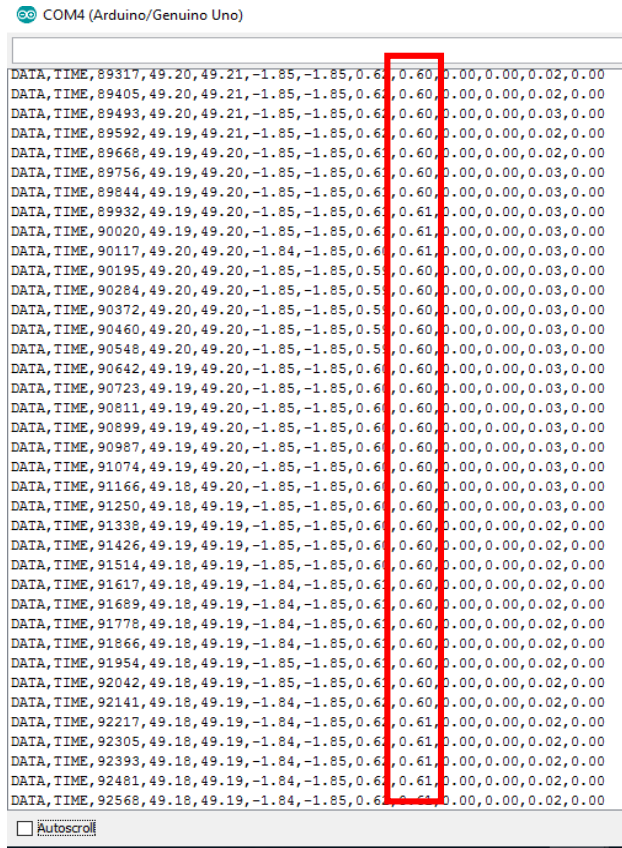
Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.16). Angka yang perlu dilihat dari keluaran *gyroscope* adalah angka pada <FR> (*Filtered Roll*) (Gambar 4.17). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ , dan  $60^\circ$  di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.18). Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



**Gambar 4.16.** *Gyroscope* pada geladak model fisik



**Gambar 4.17.** *Gyroscope* dan geladak saat proses kalibrasi



**Gambar 4.18.** Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam

Gambar 4.18 merupakan tampilan output di komputer. Tabel 4.24 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam. Tabel 4.25 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* diputar berlawanan arah jarum jam.

**Tabel 4.24.** Kalibrasi searah jarum jam

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	-0.37
10°	-10.38
20°	-20.14
30°	-30.05
40°	-40.18
50°	-50.61
60°	-60.20



**Tabel 4.25.** Kalibrasi berlawanan jarum jam

Sudut (deg)	Output Giro (satuan)
0°	0.60
10°	10.20
20°	20.42
30°	30.75
40°	40.44
50°	50.05
60°	60.30

Tabel 4.24 dan Tabel 4.25 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.19. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, keluaran yang dihasilkan oleh Arduino mempunyai persamaan sesuai Tabel 4.26. Hal ini menunjukkan keluaran yang dikeluarkan merupakan sudut yang dibentuk dengan nilai positif menunjukkan berlawanan jarum jam dan negatif searah jarum jam. Kalibrasi dilakukan antara sudut 0° hingga 60° searah dan berlawanan arah jarum jam karena gerakan SPAR diasumsikan tidak akan bergerak *pitch* lebih dari 60°. Selain itu, validasi dilakukan dengan interval sudut sebesar 10° sehingga dapat diketahui apakah sensor dapat membaca mendekati hasil sebenarnya. Keluaran yang dihasilkan memiliki hubungan secara linier yang dapat disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.



**Gambar 4.19.** Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk

**Tabel 4.26.** Persamaan *trendline* Arduino

Searah Jarum Jam	$y=1.00x-0.45$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y=1.00x+0.27$

#### 4.4.2. Kalibrasi Image Processing

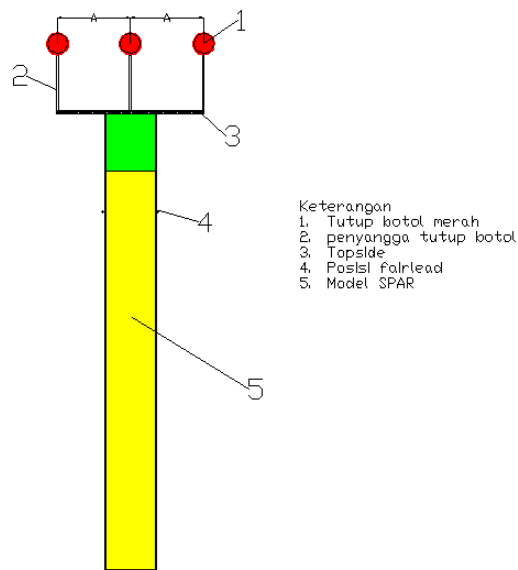
*Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk merekam gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan maju-mundur (*surge*) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Dalam proses representasi dan pemodelan, kuantitas dan karakter dari *pixel* menggambarkan suatu objek. *Pixel* merupakan satuan titik kecil yang menyusun sebuah gambar. Setiap *pixel* pada gambar menyimpan informasi warna. Banyaknya *pixel* yang menyusun suatu gambar tergantung pada resolusi gambar.

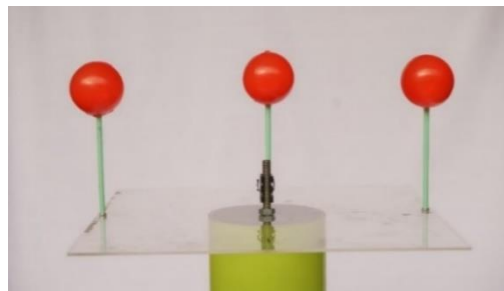
Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada gambar yang direkam. Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++.



**Gambar 4.20.** Kamera dan bola yang ditinjau



**Gambar 4.21.** Sketsa model fisik dalam *Image Processing*



**Gambar 4.22.** Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau

Langkah-langkah yang digunakan dalam menganalisa *image processing* ini adalah sebagai berikut:

#### 1. *Input Video*

*Input* video dilakukan dengan menggunakan kamera *real time* yang menggunakan lensa *fixed focus*. Kamera yang digunakan adalah webcam logitech c270 dengan kualitas gambar 3 MP dan *high definition video* HD 720p.



**Gambar 4.23.** Webcam Logitech c270 dengan lensa *fixed focus*

## 2. Pemisahan *Frame*

Langkah selanjutnya, perlu dilakukan konversi dari data *input video real time* yang direkam menjadi kumpulan data *frame* menggunakan bantuan perangkat lunak *visual basic C++* dengan sistem operasi berbasis Linux. Kombinasi dari data-data *frame* dinamakan video. Setiap video mempunyai banyak jumlah *frame*, data ini nantinya yang akan diambil dan diolah untuk analisa gerakan pada model.

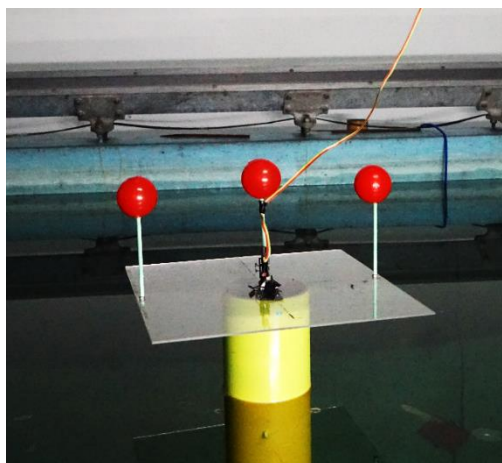
## 3. *Current image* dan *background image*

Setelah mengkonversi video menjadi data *frame*, Gambar *frame* pertama yang dihasilkan dinamakan *background image* sedangkan untuk gambar selain gambar pertama dinamakan *current images*.

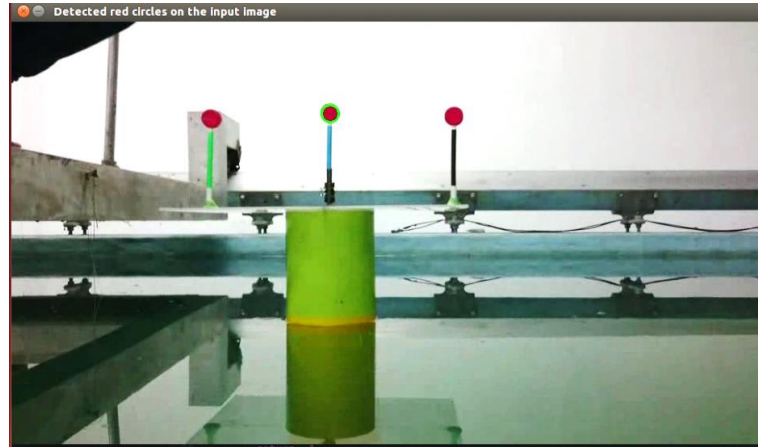
## 4. *Background subtraction*

*Background subtraction* artinya pada tahap ini dilakukan pengurangan dari *current image* dan *background image*. *Current image* diperbarui setiap waktu perekaman sedangkan untuk *background image* tetap konstan menggunakan gambar pada *frame* awal. Dengan menggunakan teknik ini dapat diketahui besar perpindahan objek.

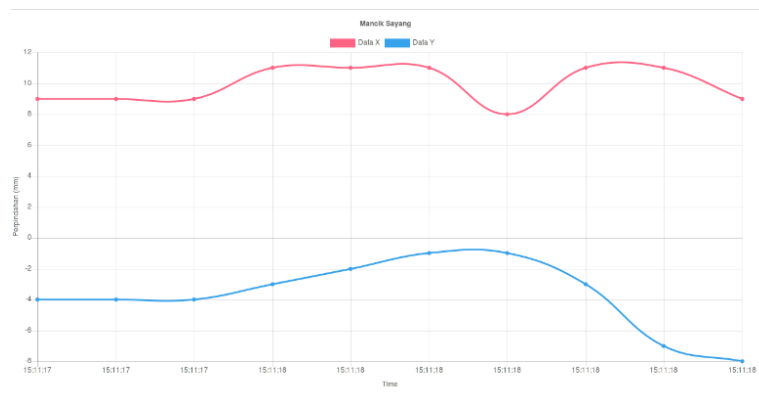
Gambar 4.24 merupakan contoh uji *image processing* yang dilakukan untuk merekam gerakan. Warna merah akan ditangkap oleh sistem *image processing* seperti pada Gambar 4.25. Keluaran dari gerakan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan 4.27.



**Gambar 4.24.** Model fisik dengan bola merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan *image processing*



**Gambar 4.25.** *Background image* yang digunakan sebagai gambar acuan



**Gambar 4.26.** Keluaran grafik dari data *frame* yang dihasilkan untuk gerakan *heave* dan *surge*

```

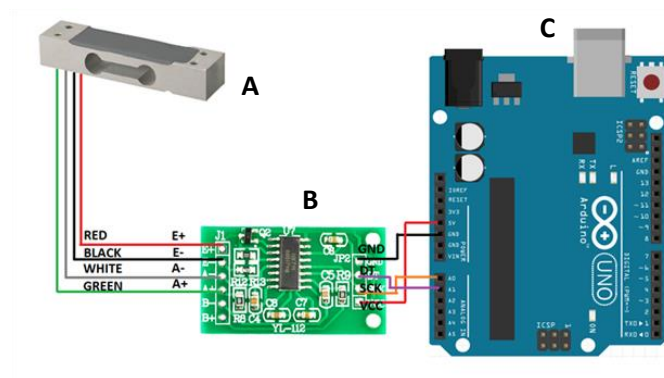
2017-4-3_15:5:7_1 x
2017-4-3;15:5:7;4109;-1209
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;1;-2
2017-4-3;15:5:7;0;-1
2017-4-3;15:5:7;1;-2
2017-4-3;15:5:7;1;-4
2017-4-3;15:5:7;2;-4
2017-4-3;15:5:7;2;-4
2017-4-3;15:5:7;1;-6
2017-4-3;15:5:7;2;-8
2017-4-3;15:5:7;3;-9
2017-4-3;15:5:7;2;-9
2017-4-3;15:5:8;3;-12
2017-4-3;15:5:8;2;-13
2017-4-3;15:5:8;3;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-17
2017-4-3;15:5:8;4;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-18
2017-4-3;15:5:8;7;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-16
2017-4-3;15:5:8;8;-14
2017-4-3;15:5:8;7;-14
2017-4-3;15:5:9;8;-13
2017-4-3;15:5:9;7;-12
2017-4-3;15:5:9;7;-11
2017-4-3;15:5:9;8;-9
2017-4-3;15:5:9;9;-8
2017-4-3;15:5:9;8;-4
2017-4-3;15:5:9;8;-3

```

**Gambar 4.27.** Keluaran datalog dari data *frame* yang dihasilkan

#### 4.4.3. Kalibrasi *Load cell*

Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *Load cell*. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Jika *load cell* mengalami tarikan maka *strain-gauge* akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan listrik. Tegangan listrik ini kemudian diamplifikasi menggunakan modul elektronik HX711 agar dapat terbaca. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam bentuk angka-angka digital.



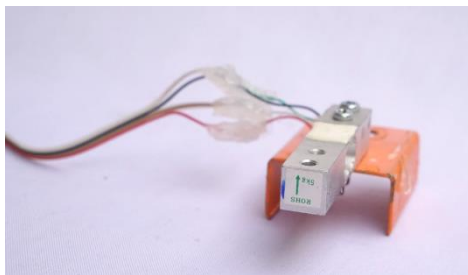
**Gambar 4.28.** Konfigurasi *Load cell* (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)  
(Layad Circuit, 2010)

Pada studi eksperimen, 4 *load cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali dari 4 tali tambat, sehingga diperlukan 4 HX711 (*amplifier*) dan 4 *channel* dari 1 Arduino UNO. Arduino merupakan *platform open source* sehingga program dapat diunduh dengan mudah. Untuk pembacaan *load cell* digunakan program milik Jeff Rowberg (2012) dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini akan menampilkan angka-angka dengan format sebagai berikut:

DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <COMPUTED YAW>, <PITCH>,  
<COMPUTED PITCH>, <ROLL>, <COMPUTED ROLL>, <LC1>,  
<LC2>, <LC3>, <LC4>

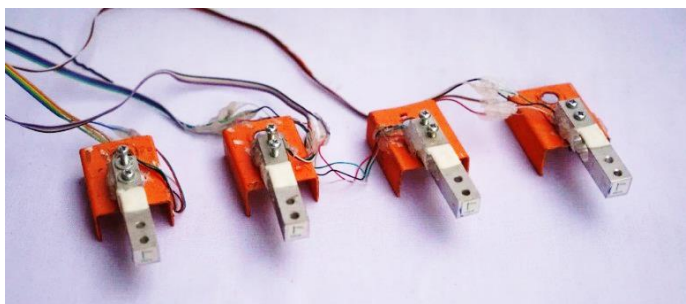
Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 5kg. *Load cell* akan berfungsi jika beban

mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell* (Gambar 4.29). 4 buah *load cell* yang digunakan terdapat pada Gambar 4.30..



**Gambar 4.29.** Instrumen *Load cell* dan arah beban

Untuk keperluan kalibrasi *Load cell*, angka yang perlu dilihat adalah angka pada kolom <LC1> (*Load cell 1*), <LC2> (*Load cell 2*), <LC3> (*Load cell 3*), dan <LC4> (*Load cell 4*). Angka digital yang ditampilkan oleh laptop perlu dikalibrasi sehingga dapat diketahui nilai yang sesungguhnya. Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.31). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran. Besi timbangan juga sudah diukur ulang di Laboratorium Mekanika Tanah menggunakan timbangan elektronik dan menunjukkan nilai  $\pm 1$  gram.



**Gambar 4.30.** Keempat *Load cell* yang digunakan

Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.

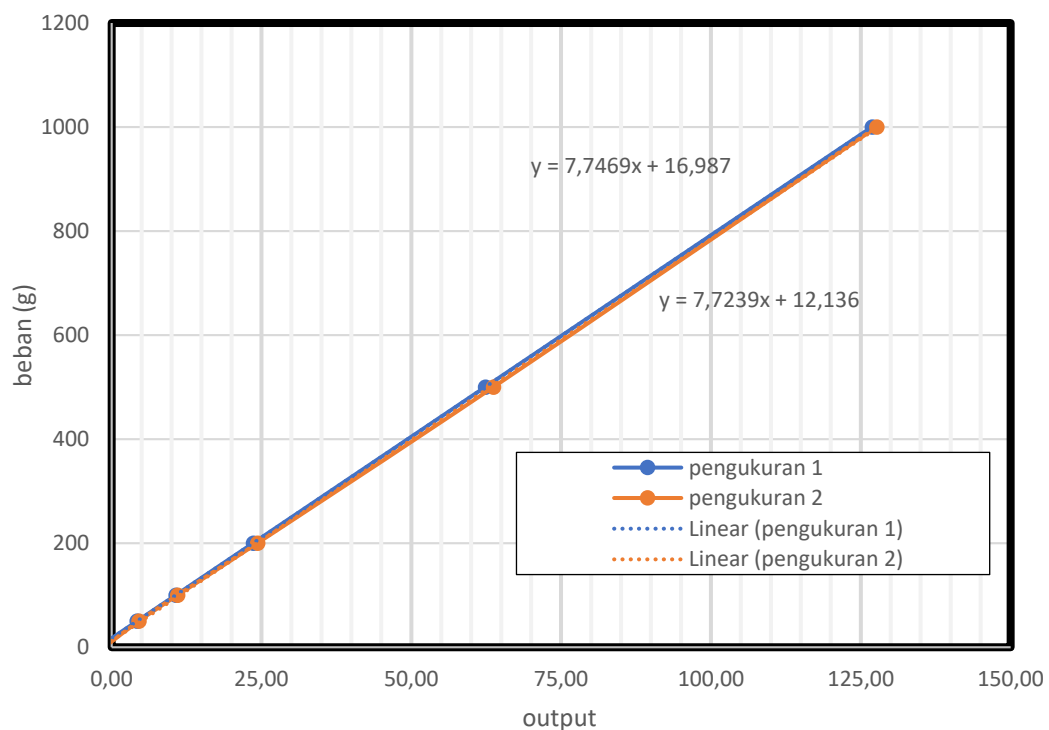


**Gambar 4.31.** Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E)

Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda.

- *Load cell 1*

Data pada Tabel 4.27 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.32. Gambar 4.32 menunjukkan *Load cell 1* mempunyai persamaan linier. sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



**Gambar 4.32.** Grafik kalibrasi *Load cell 1*



**Tabel 4.27.** Data kalibrasi *load cell* 1 percobaan 1

<b>Beban (g)</b>	<b>Output Percobaan 1</b>	<b>Output Percobaan 2</b>
1000	126.9	127.7
500	62.4	63.7
200	23.6	24.3
100	10.7	11.0
50	4.3	4.5
0	0	0

- *Load cell 2*

Data pada Tabel 4.28 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.33. Gambar 4.33 menunjukkan *Load cell 2* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

**Tabel 4.28.** Data kalibrasi *load cell* 2

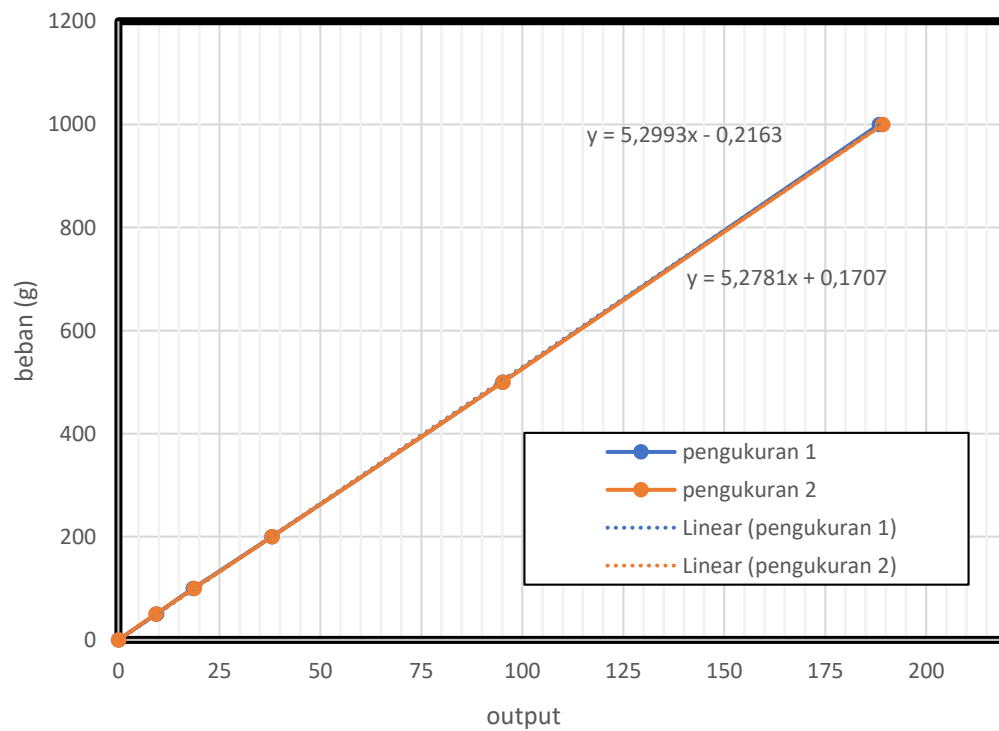
<b>Beban (g)</b>	<b>Output Percobaan 1</b>	<b>Output Percobaan 2</b>
1000	188.4	189.2
500	95.1	95.15
200	37.95	38.02
100	18.5	18.72
50	9.4	9.22
0	0	0

- *Load cell 3*

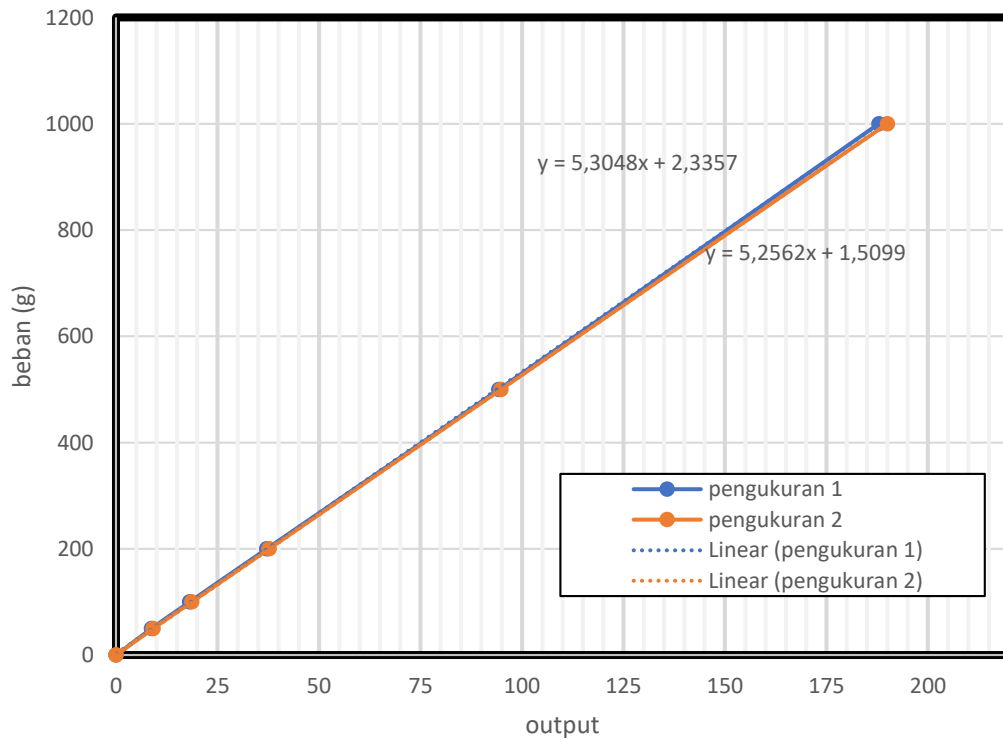
Data pada Tabel 4.29 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.34. Gambar 4.34 menunjukkan *Load cell 3* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

**Tabel 4.29.** Data kalibrasi *load cell 3*

Beban (g)	Output Percobaan 1	Output Percobaan 2
1000	187.9	190.0
500	94.3	94.8
200	37.1	37.7
100	18.1	18.6
50	8.7	9.1
0	0	0



**Gambar 4.33.** Grafik kalibrasi *Load cell 2*



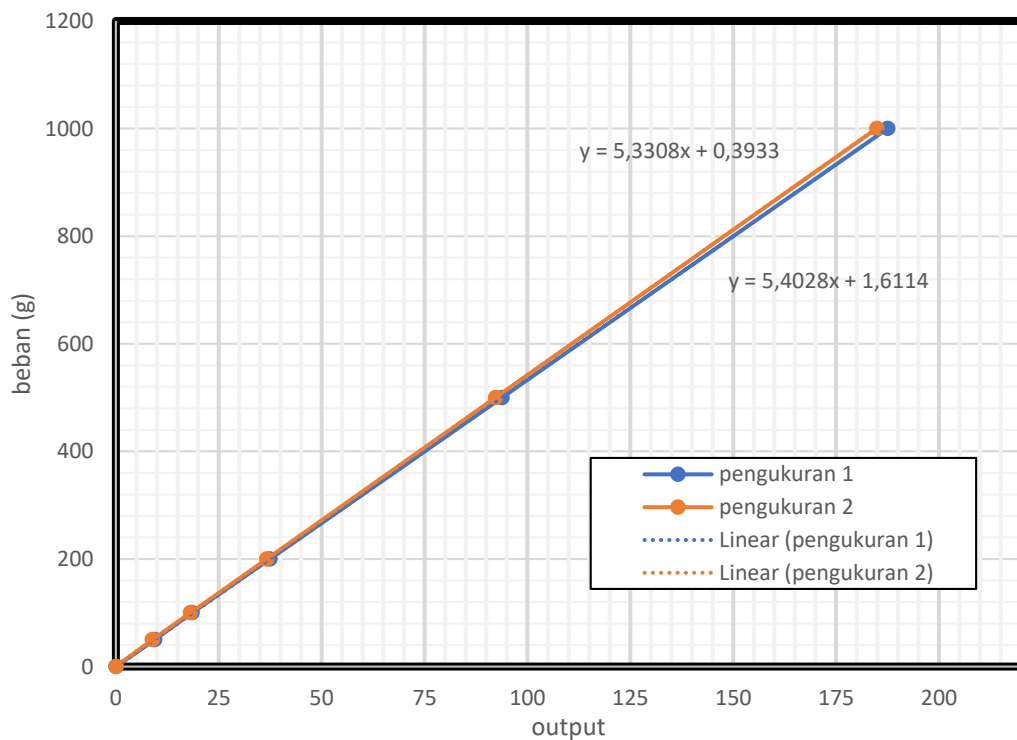
**Gambar 4.34.** Grafik kalibrasi *Load cell 3*

- *Load cell 4*

Data pada Tabel 4.30 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.35. Gambar 4.35 menunjukkan *Load cell 4* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

**Tabel 4.30.** Data kalibrasi *load cell 4*

Beban (g)	Output Percobaan 1	Output Percobaan 2
1000	187.5	184.8
500	93.8	92.2
200	37.4	36.6
100	18.5	18.1
50	9.4	8.8
0	0	0



**Gambar 4.35.** Grafik kalibrasi *Load cell* 4

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.31.

**Tabel 4.31.** Persamaan Kalibrasi Keluaran *Load cell* dengan Beban

LOAD CELL 1	$y = 7.72x + 12.12$
LOAD CELL 2	$y = 5.28x + 0.17$
LOAD CELL 3	$y = 5.26x + 1.51$
LOAD CELL 4	$y = 5.40x + 1.61$

## 4.5. RAO TERAPUNG BEBAS

### 4.5.1. Metode Analitis

#### 1. Mode Gerak *Surge*

Gerak *Surge* dari sebuah SPAR dapat dihitung secara analitis dengan menghitung *mass displacement* dari SPAR pada sarat yang direncanakan. Kemudian, parameter-parameter dinamis benda juga dicari seperti massa tambah, redaman dan kekakuan struktur. Setelah semua diketahui, respon gerak bangunan apung dapat dikalkulasi.

- Perhitungan *displacement*

*Displacement prototype* berdiameter ( $D$ ) 16 m yang tercelup dengan sarat ( $T$ ) 135,03 m di laut dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup> dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.10

$$\Delta = \frac{1}{4} \pi D^2 T \rho g \quad (4.10)$$

Tabel 4.37. menampilkan hasil perhitungan *displacement* dan perbandingannya dengan data JIP dan analisa numerik (MOSES).

**Tabel 4.32.** Perbandingan *displacement* dari hasil data, analitik dan numerik

	DATA	ANALITIS	ERROR	NUMERIK	ERROR
MASSA (kg)	26531524.91	27834342.56	4.91%	27117650	2.21%

- Massa Tambah

Massa tambah dari mode gerak *surge* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam Persamaan 4.11 dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup> dan  $c$  jari-jari silinder 8 m. Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.33.

$$m_a = \rho \pi c^2 \quad (4.11)$$

- Kekakuan

Pada mode gerak *surge*, benda terapung tidak mempunyai kekakuan, sehingga kekakuan mode gerak *surge* adalah 0

- Redaman

Pada studi analitis kali ini, redaman (*damping*) dari struktur pada mode gerak *surge* merupakan 0 untuk penyederhanaan perhitungan.

- Gaya Eksitasi

Perhitungan gaya eksitasi gelombang menggunakan perhitungan Morrison seperti Persamaan 4.12. Bangunan SPAR berbentuk silinder dengan jari-jari ( $R$ ) sebesar 8 m, koefisien Morrison ( $C_m$ ) bernilai 1, panjang silinder tercelup ( $d$ ) bernilai 108 m.

$$F_e = (1 + C_m) \rho \pi R^2 \zeta_0 g (1 - e^{-kd}) \cos(kx - \omega t) \quad (4.12)$$

- RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung yang sudah diketahui dapat dilihat di Tabel 4.33.

**Tabel 4.33.** Parameter Perhitungan RAO

	BESARAN	SATUAN
<b>Displacement (m)</b>	27834342.56	kg
<b>Masa Tambah (ma)</b>	206140.00	Kg/m
<b>Kekakuan (k)</b>	0	N/m
<b>Damping (b)</b>	0	Ns/m

Persamaan 4.13 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m.

$$\zeta_{10} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_1 - (m + a_1)\omega^2\}^2 + (b_1\omega)^2}} \quad (4.13)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN D dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan koordinat sebagai RAO. Gambar 4.36 menampilkan grafik RAO untuk gerak *surge*.

## 2. Mode Gerak *Heave*

Pada mode gerak *heave* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.

- Perhitungan *displacement*

*Displacement* SPAR dalam mode gerak *heave* sama dengan dalam mode gerak *surge* sehingga nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.34.

- Massa Tambah

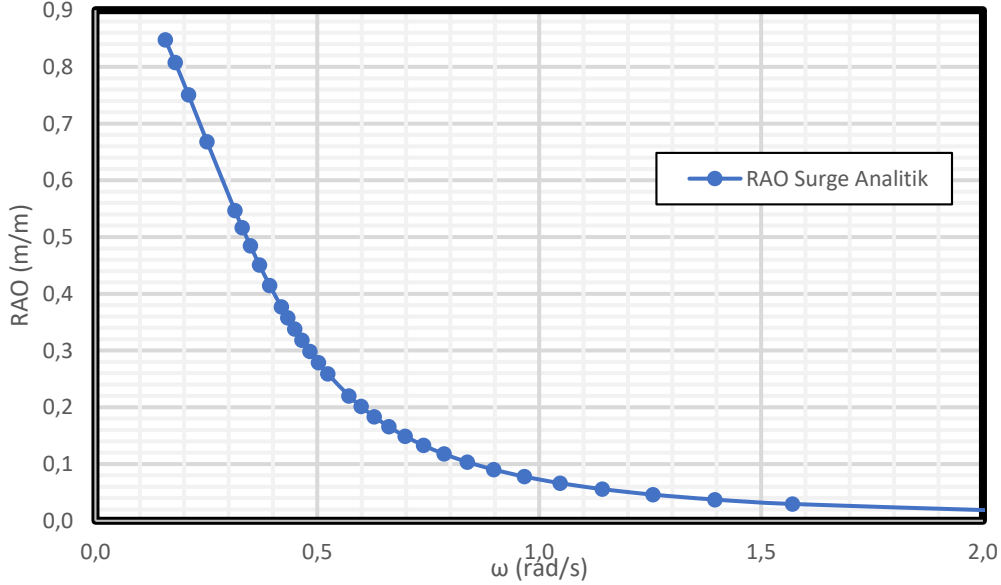
Massa tambah dari mode gerak *heave* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam persamaan 4.14, dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup> dan  $c$  jari-jari silinder 8 m. Namun, pada kasus SPAR permukaan yang tercelup merupakan setengah bagian, sehingga massa tambah SPAR menjadi 1/2  $m_a$ . Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.34.

$$m_a = \frac{8}{3}\rho c^3 \quad (4.14)$$

- Kekakuan

Pada mode gerak *heave* kekakuan struktur dapat dihitung dengan persamaan 4.15, dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup>, percepatan

gravitasi ( $g$ )  $9.81 \text{ m/s}^2$  dan  $A_w$  merupakan luas bidang air (*Water Plane Area*, WPA). SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *heave* dilampirkan dalam Tabel 4.34.



**Gambar 4.36.** Grafik RAO *surge* analitis

$$k_3 = \rho g A_w \quad (4.15)$$

- Damping

Pada studi analitis kali ini, damping dari struktur pada mode gerak *heave* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk meniasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

- Gaya Eksitasi

Menurut Journee (2001) gaya eksitasi gelombang pada silinder dalam mode gerak *heave* ditampilkan dalam Persamaan 4.16. Dengan  $k$  angka gelombang,  $c$  kekakuan benda pada mode gerak *heave*,  $a$  massa tambah benda.  $b$  koefisien damping sistem dan  $\omega$  sebagai frekuensi.

$$\frac{F_a}{\zeta_a} = e^{-kT} \sqrt{\{c - a\omega^2\}^2 + \{b\omega\}^2} \quad (4.16)$$

- RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *heave* terdapat dalam Tabel 4.34.

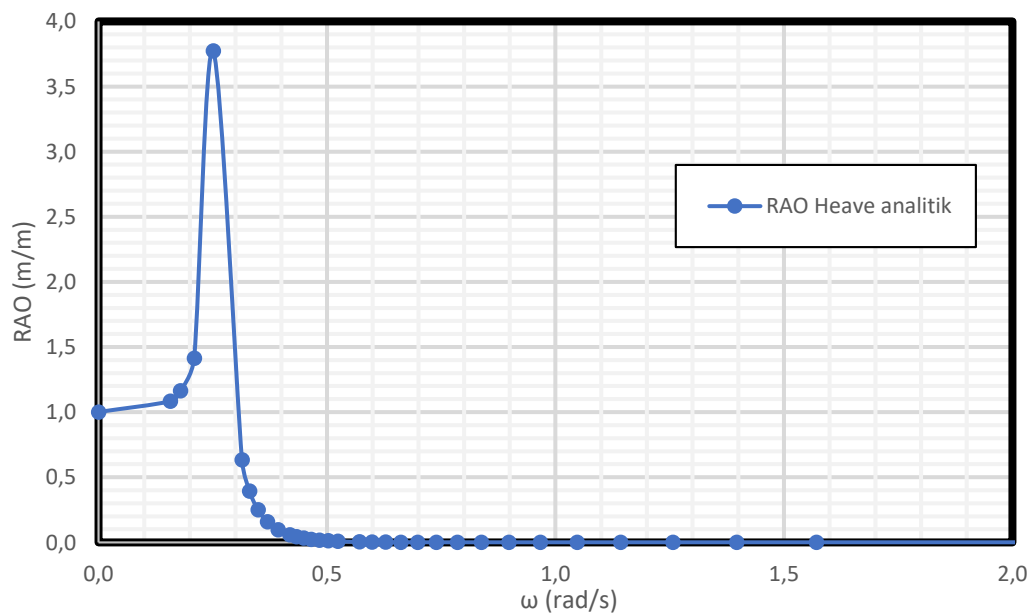
**Tabel 4.34.** Parameter Perhitungan RAO *Heave*.

	BESARAN	SATUAN
<b>Displacement (m)</b>	27834342.56	kg
<b>Masa Tambah (ma)</b>	699995.77	kg
<b>Kekakuan (k)</b>	2022233.43	N/m
<b>Damping (b)</b>	0	Ns/m

Persamaan 4.17 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{30} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_3 - (m + a_3)\omega^2\}^2 + (b_3\omega)^2}} \quad (4.17)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN D dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan oordinat sebagai RAO. Gambar 4.37 menampilkan grafik RAO untuk gerak *heave* SPAR.



**Gambar 4.37.** Grafik RAO *heave* analitis

### 3. Mode Gerak *Pitch*

Pada mode gerak *pitch* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.



- Perhitungan *displacement*

Displacement SPAR dalam mode gerak *pitch* sama dengan dalam mode gerak *surge* maupun *heave* sehingga, nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.35.

- Momen inersia massa tambah

Momen inersia massa tambah dari SPAR dapat menggunakan rumus momen inersia massa pada sebuah silinder yang tercelup pada persamaan 4.18, dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup>,  $R$  merupakan jari-jari SPAR sebesar 8 m dan  $l$  merupakan panjang SPAR sebesar 154.2 m.

$$I_a = \rho \pi R^2 l (l/2)^2 \quad (4.18)$$

- Kekakuan

Pada mode gerak *pitch* kekakuan struktur dapat dihitung dengan Persamaan 4.19, dengan massa jenis ( $\rho$ ) 1.025 kg/m<sup>3</sup>, percepatan gravitasi ( $g$ ) 9.81 m/s<sup>2</sup> dan  $GM_L$  merupakan jarak titik *metacenter* SPAR dengan titik berat SPAR yaitu sebesar 5.6 m. SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *pitch* dilampirkan dalam Tabel 4.35.

$$k_s = \rho g \nabla \overline{GM_L} \quad (4.19)$$

- *Damping*

Pada studi analitis kali ini, *damping* dari struktur pada mode gerak *pitch* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk menyiasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

- Momen Gaya

SPAR mengalami gerakan *pitch* diakibatkan adanya momen gaya. Sehingga persamaan momen gaya pada SPAR untuk gerakan *pitch* dapat dilihat pada persamaan 4.20.

$$M = (1 + C_M) \rho \pi R_1^2 \zeta_0 \omega^2 \cos(kx_c - \omega t) \int e^{kz} dz \quad (4.20)$$

- RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *pitch* terdapat dalam tabel 4.35.

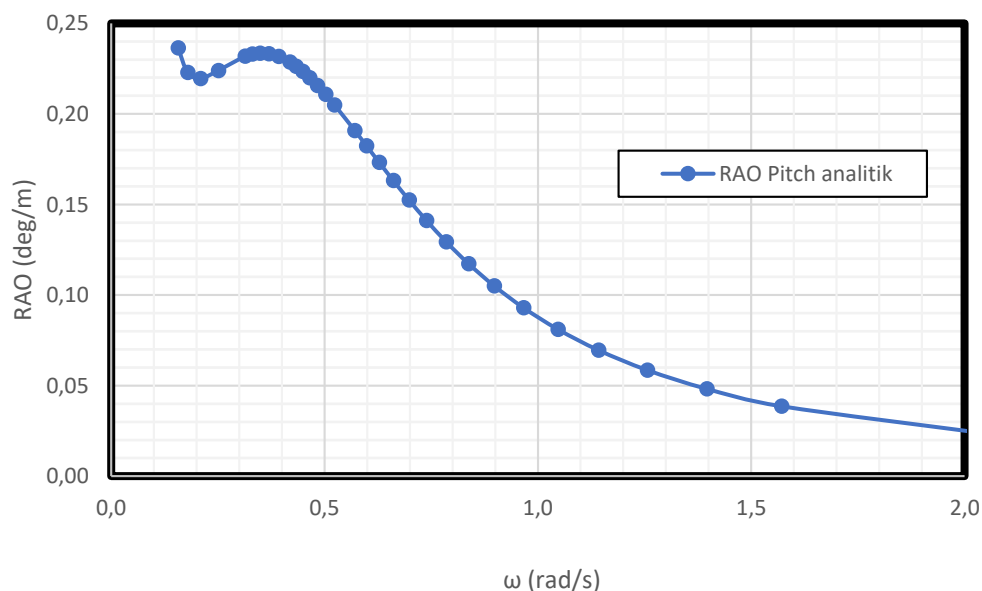
**Tabel 4.35.** Parameter Perhitungan RAO *Pitch*

	BESARAN	SATUAN
<b>Displacement (m)</b>	27834342.56	kg
<b>Momen inersia total (I+Ia)</b>	168285107.360	ton.m <sup>2</sup>
<b>Kekakuan (k)</b>	1.5E+06	KN.m
<b>Damping (b)</b>	0	Ns/m

Persamaan 4.21 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{\theta} = \frac{M/k}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + 2b_f \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (4.21)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN D dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan ordinat sebagai RAO. Gambar 4.38 menampilkan grafik RAO untuk gerak *pitch* SPAR.



**Gambar 4.38.** Grafik RAO *pitch* analitis

#### 4.5.2. Metode Numeris

Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi terapung bebas dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah distribusi massa dari SPAR berupa *Center of Gravity* dan Radius Girasi.

##### 1. Mode Gerak *Surge*

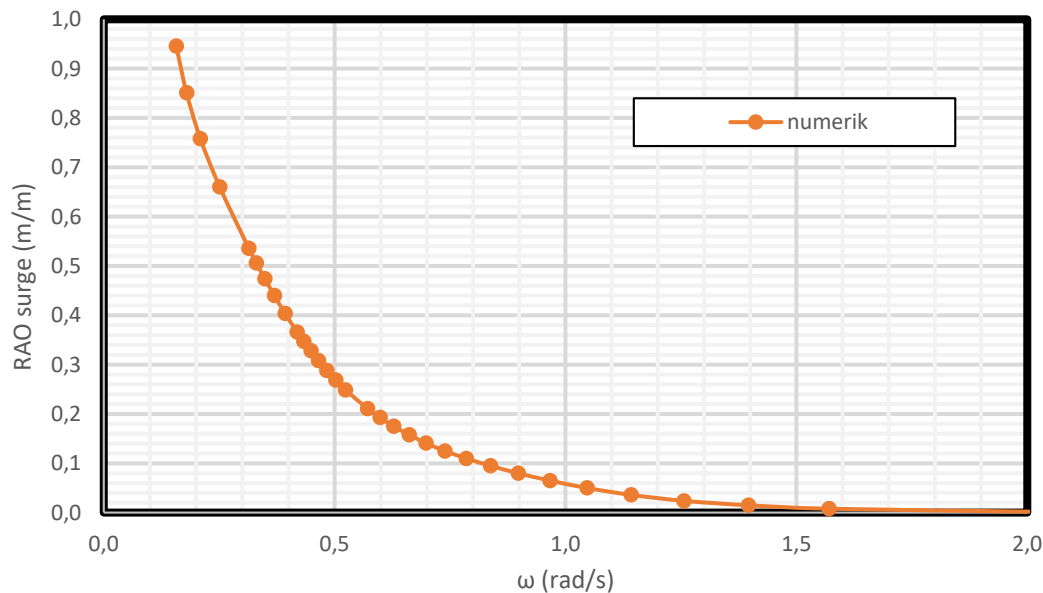
Gambar 4.39 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR. Pada mode gerak *surge* tidak ditemukan pembesaran nilai RAO akibat adanya resonansi. Hal ini terjadi karena gerak *surge* dari bangunan apung tidak memiliki kekakuan.

##### 2. Mode Gerak *Heave*

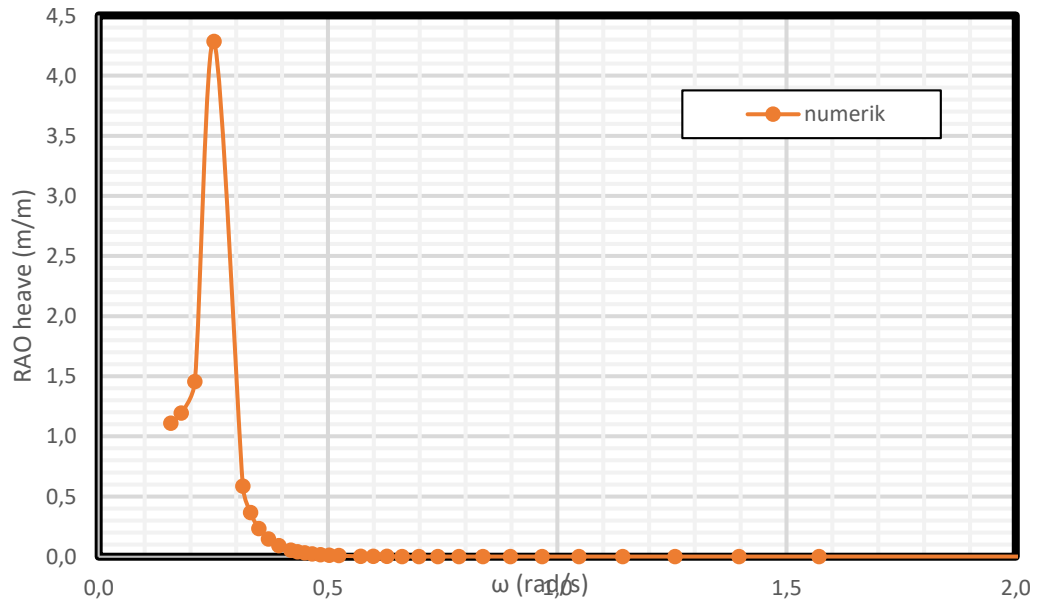
Gambar 4.40. menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR. Dalam metode numerik, daerah resonansi dari *heave* juga terlihat. Gambar 4.40 menampilkan perhitungan numerik dengan gelombang *heading 0*

##### 3. Mode Gerak *Pitch*

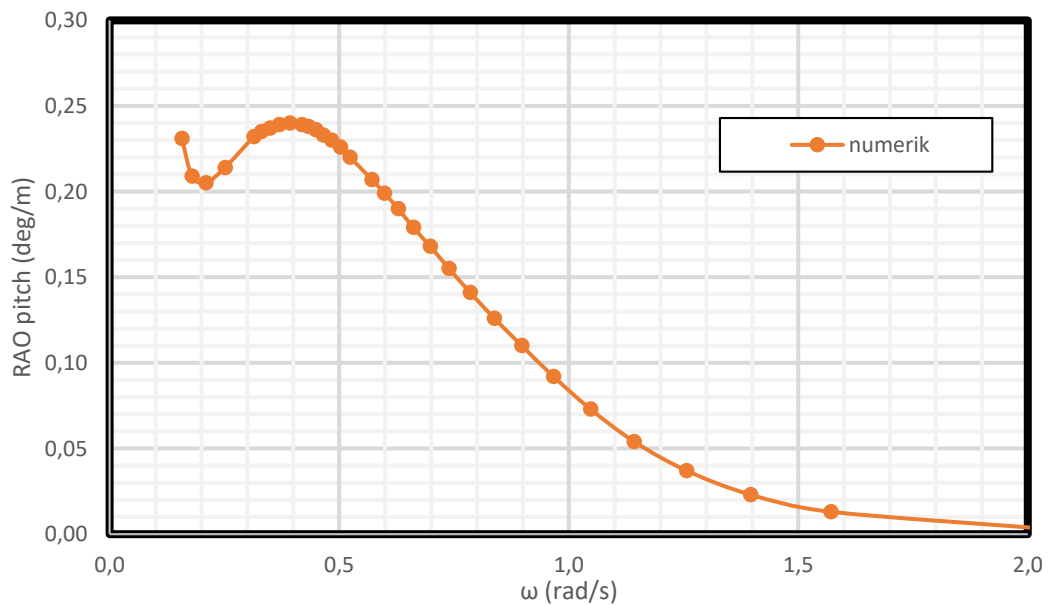
Gambar 4.41 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari SPAR dengan *heading 0* derajat.



**Gambar 4.39.** Grafik RAO *surge* numerik



**Gambar 4.40.** Grafik RAO *heave* numerik



**Gambar 4.41.** Grafik RAO *pitch* numeris

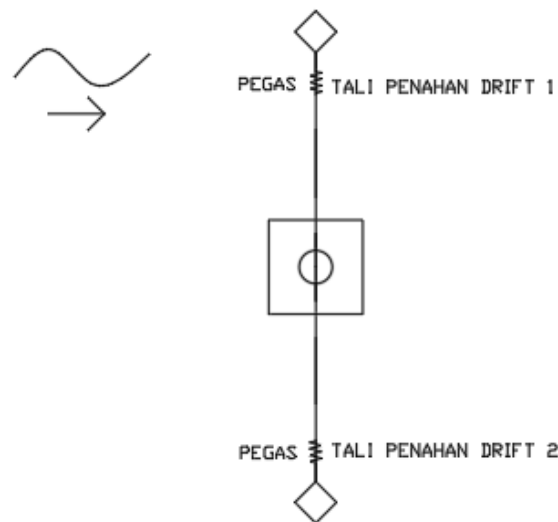
#### 4.5.3. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model eksperimen SPAR diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalaman 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi terapung bebas SPAR diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.42.

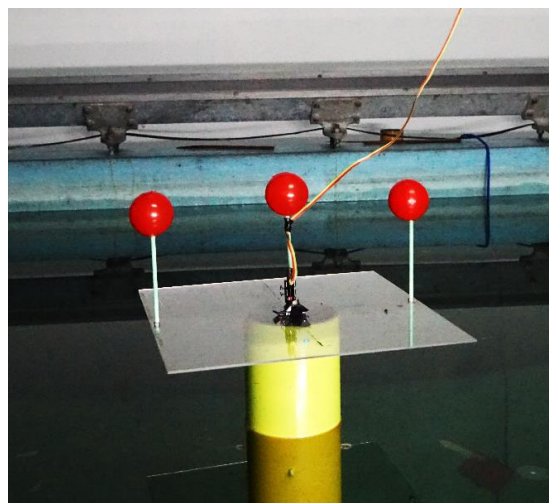
Dua tali penahan *drift* digunakan untuk menjaga posisi dari struktur sehingga sesuai dengan arah yang diinginkan. Tali penahan *drift* dipasang

renggang, hal ini dipasang sedemikian hingga agar tali tidak mempengaruhi gerak struktur, namun apabila *drifting* mampu menggeser model maka tali ini akan menahannya.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari wave maker. Model akan dikenai tujuh gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.36. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan yaitu 5 cm. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.



**Gambar 4.42.** Konfigurasi tali penahan *drift*



**Gambar 4.43.** Model SPAR kondisi terapung bebas

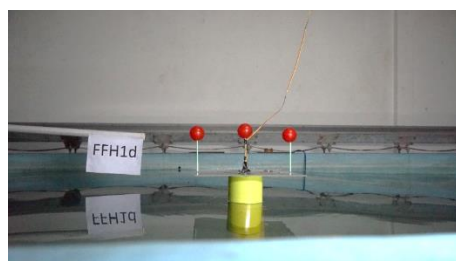


**Gambar 4.44.** Lampu untuk penerangan

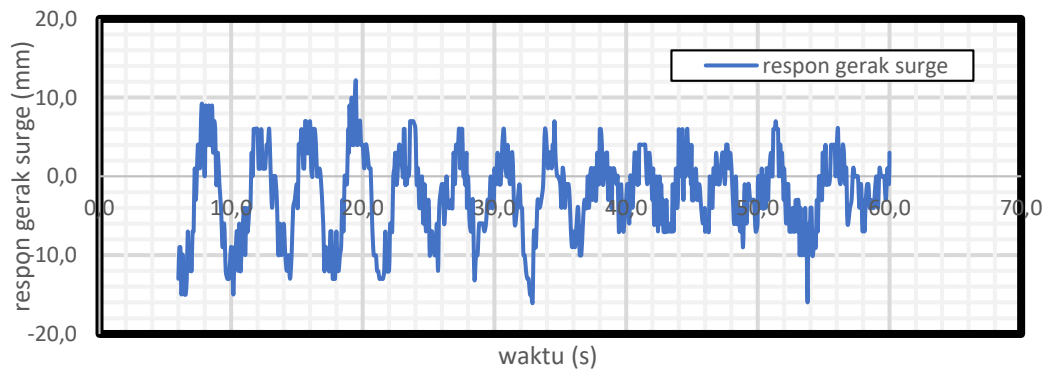
Setiap eksperimen mempunyai identitas eksperimen masing-masing. Kode eksperimen digunakan untuk setiap kondisi seperti pada gambar 4.45. Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.46 , 4.47 dan 4.48 merupakan salah satu contoh dari *time history* keluaran instrumen.

**Tabel 4.36.** Periode lingkungan dan periode eksperimen

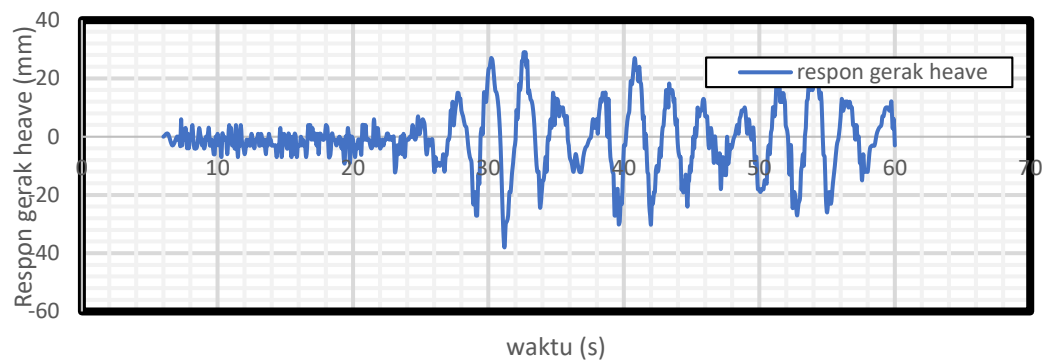
No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FFH1a	40	3.60	2.5
2	FFH1b	30	2.70	
3	FFH1c	25	2.20	
4	FFH1d	20	1.80	
5	FFH1e	10	0.90	
6	FFH1f	35	3.10	
7	FFH1g	5.5	0.50	



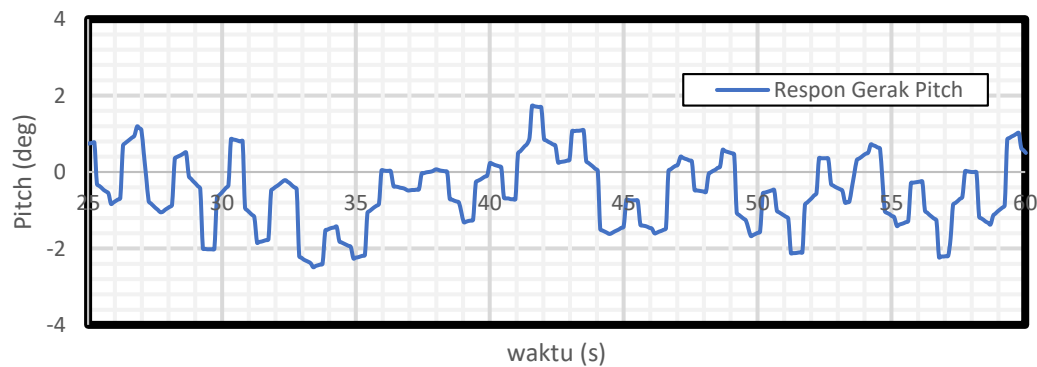
**Gambar 4.45.** Kode eksperimen



**Gambar 4.46.** Time history instrumen *image processing* untuk gerakan *surge*



**Gambar 4.47.** Time history instrumen *image processing* untuk gerakan *heave*



**Gambar 4.48.** Time History instrumen *gyroscope* untuk gerakan *pitch*

#### 1. Mode Gerak *Surge*

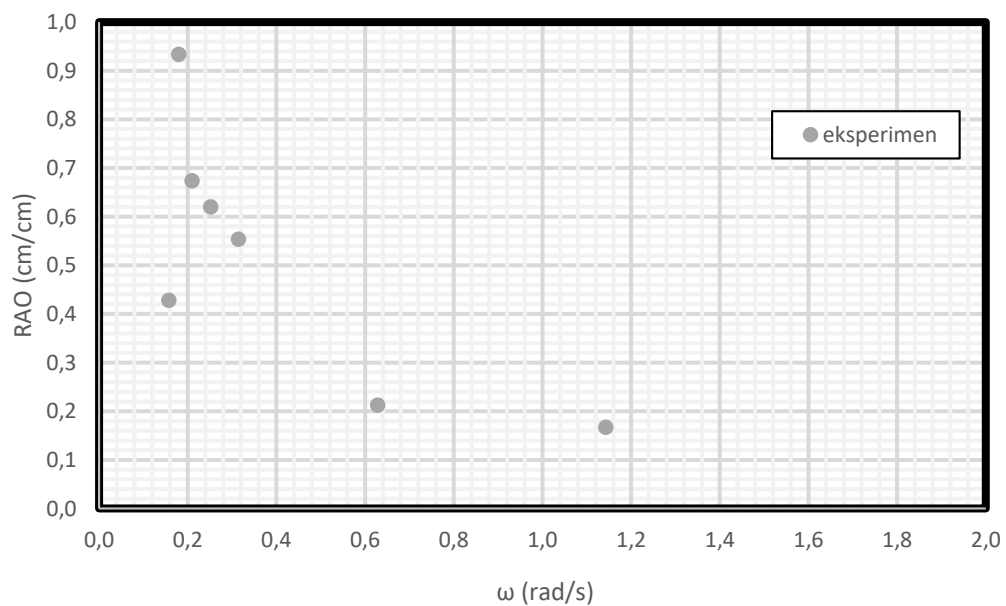
Setiap time history pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.37 menunjukkan respon gerak dan periode respon

struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.37.** Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.0692	3.75	0.4277	0.96
2	FFH1b	1.6833	2.7273	0.6733	0.99
3	FFH1c	1.55	2.222	0.62	0.99
4	FFH1d	1.3833	2.00	0.5553	0.9
5	FFH1e	0,5308	1,00	0.2123	0,9
6	FFH1f	2.333	3.0769	0.9333	1.0075
7	FFH1g	0.433	0.47	0.1667	1.06

Kolom RAO pada Tabel 4.37 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.49 berikut ini.



**Gambar 4.49.** Grafik RAO *surge* hasil eksperimen

## 2. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon

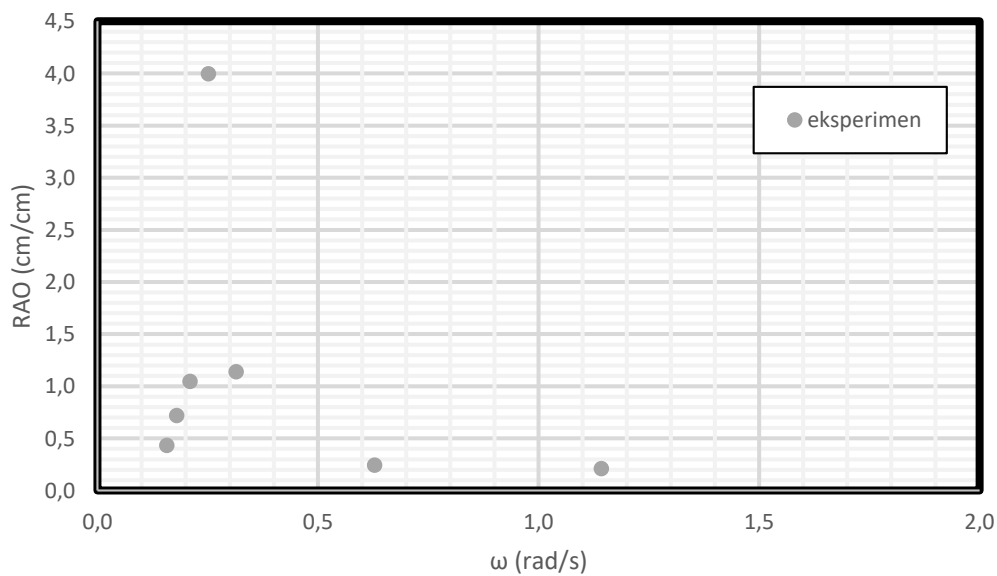


yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.38 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.38.** Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Gerak	Respon Periode	RAO	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.083	3.6363	0.433	0.98
2	FFH1b	2.617	2.72	1.047	0.99
3	FFH1c	9.915	2.22	3.996	0.99
4	FFH1d	2.85	1.8181	1.14	0.99
5	FFH1e	0.614	1.00	0.246	0.9
6	FFH1f	1.8	3.00	0.72	1.033
7	FFH1g	0.528	0.56	0.21	0.9

Kolom RAO pada Tabel 4.38 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *heave* seperti pada gambar 4.50 berikut:



**Gambar 4.50.** Grafik RAO *heave* hasil eksperimen

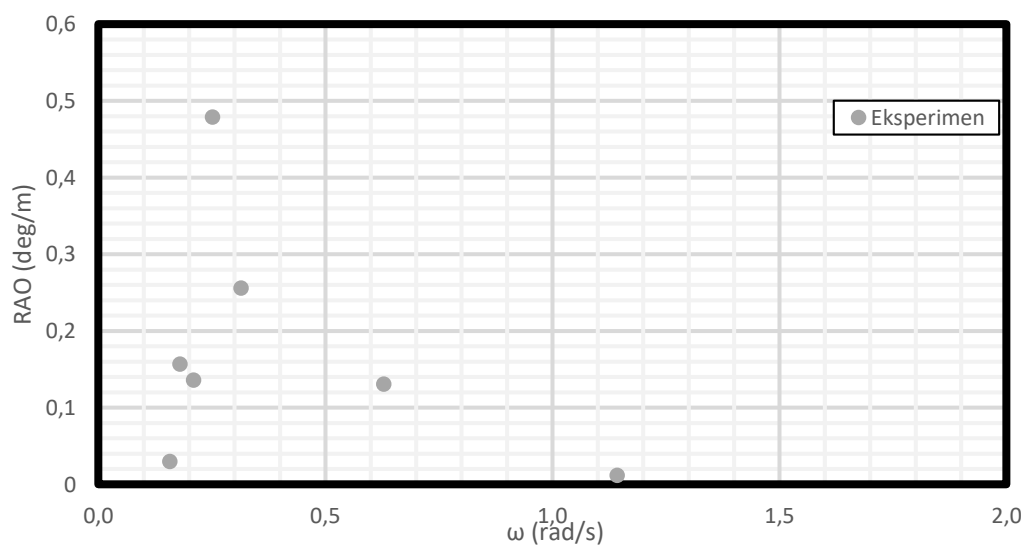
### 3. Mode Gerak *Pitch*

Setiap time history pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.39 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

**Tabel 4.39.** Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Gerak	Respon Periode	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	0.074	3.316	0.030	0.947
2	FFH1b	0.339	2.926	0.136	1.084
3	FFH1c	1.021	2.089	0.479	0.950
4	FFH1d	0.641	1.890	0.256	1.050
5	FFH1e	0.327	0.956	0.131	1.062
6	FFH1f	0.391	3.203	0.156	1.033
7	FFH1g	0.026	0.465	0.012	0.931

Kolom RAO pada Tabel 4.39 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *pitch* seperti yang disajikan pada Gambar 4.51. berikut ini.

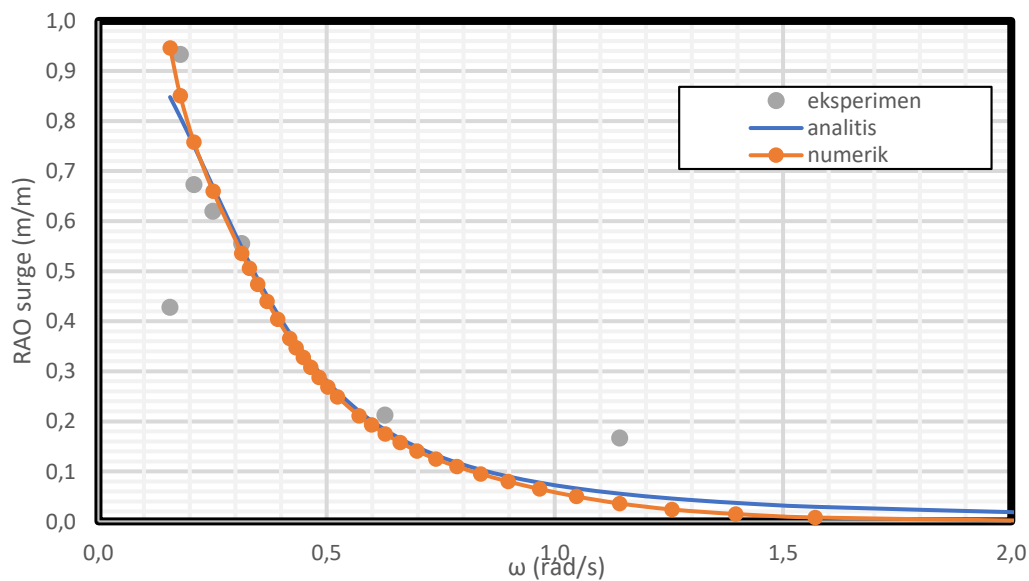


**Gambar 4.51.** Grafik RAO *pitch* hasil eksperimen

#### 4.5.4. Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.52, 4.53 dan 4.54 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

Metode perhitungan eksperimen analitis dan numerik menunjukkan hasil yang konsisiten untuk gerak *surge*. Tabel 4.40 menunjukkan perbandingan dari 3 metode analisa dari gerak *surge*.



**Gambar 4.52.** Perbandingan RAO *surge* secara analitis, numeris dan eksperimen

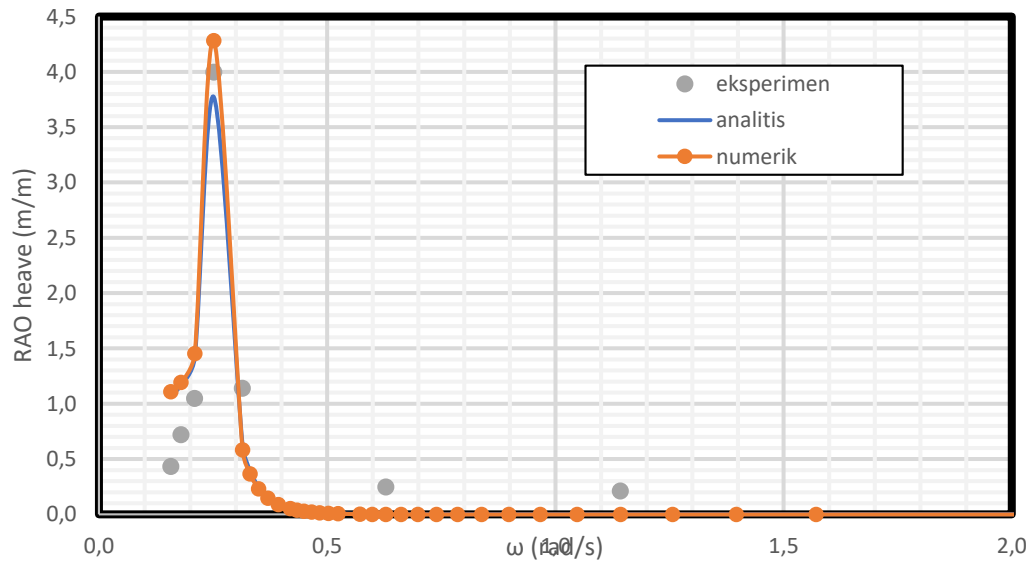
**Tabel 4.40.** Perbandingan RAO *surge* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.157	0.848
Numeris	0.157	0.946
Eksperimen	0.180	0.933

Metode perhitungan eksperimen analitis dan numerik menunjukkan hasil yang konsisiten untuk gerak *heave*. Peristiwa resonansi juga tertangkap oleh metode eksperimen di frekuensi yang sama dengan metode analitis dan metode numeris. Tabel 4.41 menunjukkan perbandingan dari 3 metode analisa gerak *heave*

**Tabel 4.41.** Perbandingan RAO *heave* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.251	3.772
Numeris	0.251	4.297
Eksperimen	0.251	3.996

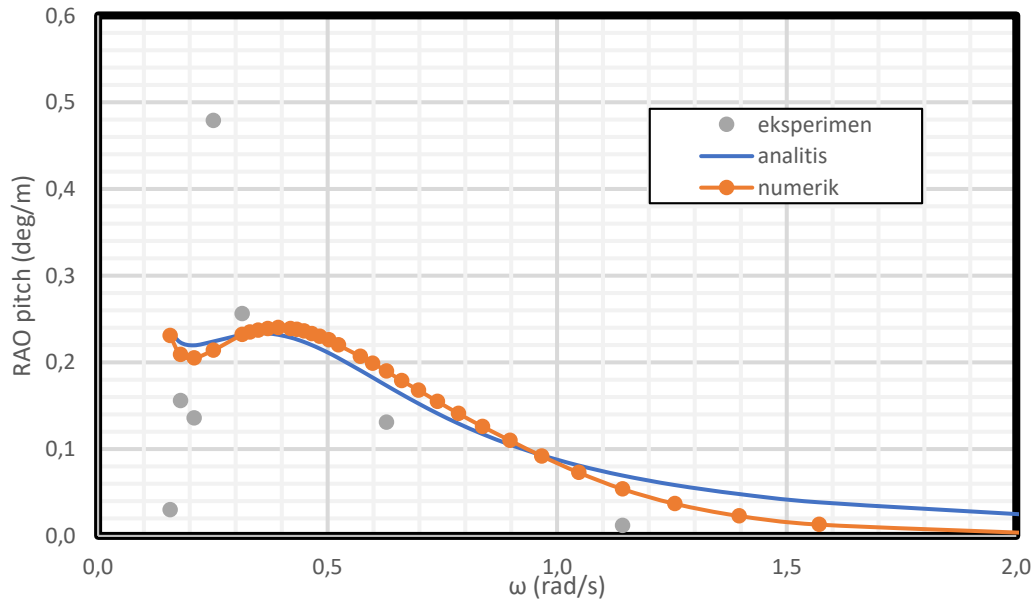


**Gambar 4.53.** Perbandingan RAO *heave* secara analitis, numeris dan eksperimen

Pada gerak *pitch* terjadi perbedaan yang cukup signifikan dari metode eksperimen. Hal ini disebabkan adanya tali penahan drift yang kemungkinan merubah titik resonansi gerak *pitch*. Tabel 4.42 menunjukkan perbandingan ketiga metode gerak *pitch*.

**Tabel 4.42.** Perbandingan RAO *pitch* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Analitis	0.157	0.237
Numeris	0.393	0.24
Eksperimen	0.251	0.479



**Gambar 4.54.** Perbandingan RAO *pitch* secara analitis, numeris dan eksperimen

## 4.6. RAO TERTAMBAT

### 4.6.1. Kekakuan Tali Tambat

Pada bangunan tertambat kekakuan hidrostatik benda akan ditambahkan dengan kekakuan tali tambat. Pada kekakuan hidrostatik, mode gerak yang memiliki kekakuan hanya gerak *heave*, *roll* dan *pitch*. Namun dengan adanya kekakuan tali tambat, ke enam mode gerak (*surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*) memiliki kekakuan baru. Pada Tugas Akhir ini, konfigurasi tali tambat merupakan jenis *taut* dan perhitungan kekakuan *surge* diselesaikan menggunakan Faltinsen (1990), kekakuan *heave* diselesaikan menggunakan Al-Solihat dan Nahon (2015) dan kekakuan *pitch* menggunakan Jain (1980). Kondisi taut mempunyai kekakuan karakteristik sesuai dengan Persamaan 4.22, dengan  $E$  sebagai modulus elastis tali,  $A$  sebagai luas penampang tali dan  $L_o$  sebagai panjang tali kondisi tak terenggang. Perhitungan Persamaan 4.22 dilakukan dengan data berdasar Tabel 4.18

$$k_I = \frac{EA}{L_o} \quad (4.22)$$

$$k_I = 5548996.458 \text{ N/m}$$

Pada kondisi *taut*, tali juga memiliki *pre-tension*, yang akan merubah panjang tali sesuai dengan Persamaan 4.23, dengan  $L_o$  sebagai panjang tali tak

terenggang,  $T$  sebagai pretension,  $E$  modulus elastisitas dan  $A$  sebagai luas penampang. Tabel 4.43 menunjukkan nilai *pre-tension* dan panjang yang terjadi.

$$L = L_o(1 + \frac{T}{EA}) \quad (4.23)$$

**Tabel 4.43.** Perhitungan *Pre Tension* dan Panjang Akibat *Pre-Tension*

<b>T</b>	904874.4	N
<b>L</b>	225.173	m

1. Kekakuan *Surge*

Kekakuan *surge* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 4.24, dengan  $k_i$  sebagai kekakuan parametrik,  $N$  sebagai jumlah tali dan  $\beta$  sebagai sudut sebar tali tambat (Gambar 4.55). Sudut sebar dapat dilihat pada Tabel 4.44. Persamaan 4.24 menunjukkan bahwa kekakuan *surge* total merupakan penjumlahan dari kekakuan tiap tali. Hasil perhitungan kekakuan tiap tali dapat dilihat di Tabel 4.45.

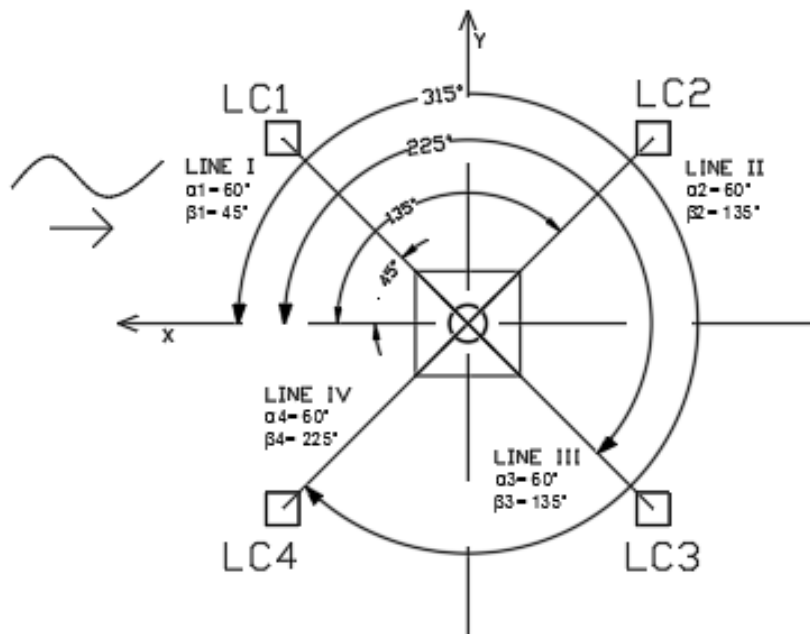
**Tabel 4.44.** Sudut sebar tali.

<b>Sudut Sebar-Line (deg)</b>	
$\beta_1$	45
$\beta_2$	135
$\beta_3$	225
$\beta_4$	315

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \beta_i \quad (4.24)$$

**Tabel 4.45.** Kekakuan *surge*

<b>K11</b>		
LineA	2774498.23	N/m
LineB	2774498.23	N/m
LineC	2774498.23	N/m
LineD	2774498.23	N/m
<b>K11 (TOTAL)</b>	<b>11097992.92</b>	<b>N/m</b>

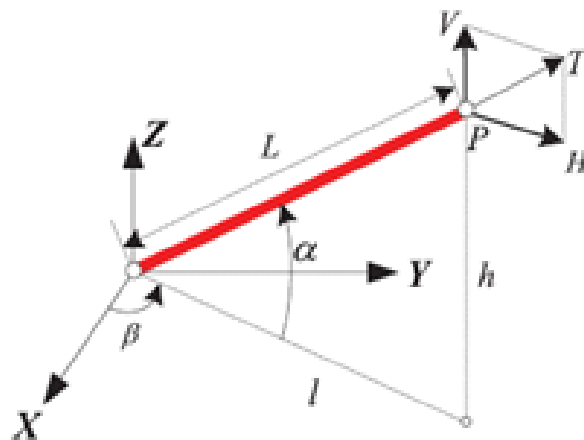


**Gambar 4.55.** Konfigurasi SPAR

## 2. Kekakuan *Heave*

Al-Solihat dan Nahon (2015) menentukan konfigurasi kekakuan tali dengan menggunakan Gambar 4.56. Konfigurasi tali tambat pada SPAR kali ini memiliki bentuk sesuai dengan Gambar 4.55. Parameter geometri dari kondisi SPAR ditampilkan pada Tabel 4.44 dan Tabel 4.46.

Setiap tali memiliki kekakuan karakteristik sesuai dengan persamaan 4.25, dengan  $H$  sebagai gaya horizontal,  $V$  gaya Vertikal,  $l$  jarak horizontal *fairlead* dengan *anchor* dan  $h$  sebagai tinggi (Gambar 4.56).



**Gambar 4.56.** Parameter geometris tali tambat. (Al-Solihat dan Nahon, 2015)

**Tabel 4.46.** Konfigurasi Sudut Tanah-Tali

Sudut Tanah-Line (deg)	
$\alpha 1$	60
$\alpha 2$	60
$\alpha 3$	60
$\alpha 4$	60

$$K^p = \begin{bmatrix} K_{11}^p & K_{12}^p \\ K_{21}^p & K_{22}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial l} & \frac{\partial H}{\partial h} \\ \frac{\partial V}{\partial l} & \frac{\partial V}{\partial h} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Konfigurasi *Taut Mooring* juga memiliki pendekatan Al-Solihat dan Nahon (2015) seperti Persamaan 4.26 (a-d).

$$H = T \cos \alpha \quad (4.26a)$$

$$V = T \sin \alpha \quad (4.26b)$$

$$l = L \cos \alpha \quad (4.26c)$$

$$h = L \sin \alpha \quad (4.26d)$$

Persamaan 4.26 diturunkan oleh Al-Solihat & Nahon (2015) sehingga menghasilkan Persamaan 4.27.

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \cos^2 \alpha K_l + \frac{T}{L} \sin^2 \alpha \quad (4.27a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \sin^2 \alpha K_l + \frac{T}{L} \cos^2 \alpha \quad (4.27b)$$

$$\frac{\partial H}{\partial h} = \frac{\partial V}{\partial l} = \cos \alpha \sin \alpha \left[ K_l - \frac{T}{L} \right] \quad (4.27c)$$

Dengan data pada Tabel 4.18 maka karakteristik kekakuan pada setiap tali dilampirkan pada Tabel 4.47.

**Tabel 4.47.** Kekakuan Karakteristik

	$k_{11}^p$ (N/m)	$k_{22}^p$ (N/m)	$k_{12}^p$ (N/m)
<b>Line A</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line B</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line C</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029
<b>Line D</b>	1389644.402	4162545.773	2401403.029

Al-Solihat & Nahon (2015) menentukan untuk gerakan *heave* dapat diselesaikan menggunakan Persamaan 4.28.



$$K_{33} = K_{22}^p \quad (4.28)$$

Setiap tali memberi kekakuan tambahan pada setiap mode gerak, sehingga kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan mode gerak pada setiap tali, sesuai dengan Persamaan 4.29. Kekakuan total tali tambat *heave* dapat dilihat di Tabel 4.48.

$$K_m = \sum_{i=1}^N [K_m^{(i)}] \quad (4.29)$$

**Tabel 4.48.** Kekakuan mode gerak *heave*

<b>K33</b>		
<b>LineA</b>	4162814.85	N/m
<b>LineB</b>	4162814.85	N/m
<b>LineC</b>	4162814.85	N/m
<b>LineD</b>	4162814.85	N/m
<b>K33 (TOTAL)</b>	16651259.40	N/m

### 3. Kekakuan *Pitch*

Jain (1980) membuat persamaan simplifikasi untuk mencari kekakuan benda tertambat. Hal ini dilakukan dengan memberi titik tambat bayangan, seperti pada Gambar 4.57. Persamaan 4.30 merupakan hasil penurunan untuk gerak *pitch* dengan  $T_o$  sebagai *pre-tension* sumbu x,  $X$  jarak radius *fairlead* dengan anchor,  $Y$  sebagai kedalaman,  $L'$  sebagai panjang baru, dan  $l$  sebagai panjang bayangan.

$$k_{55} = T_o \left[ w \left( \frac{T_B L' - T_A l}{T_A - T_B} \right) \left\{ \frac{X}{T_o} - \left( \frac{T_B L' - T_A l}{T_A T_B} \right) \right\} - \frac{T_o^2 Y}{T_A T_B} \right]^{-1} \quad (4.30)$$

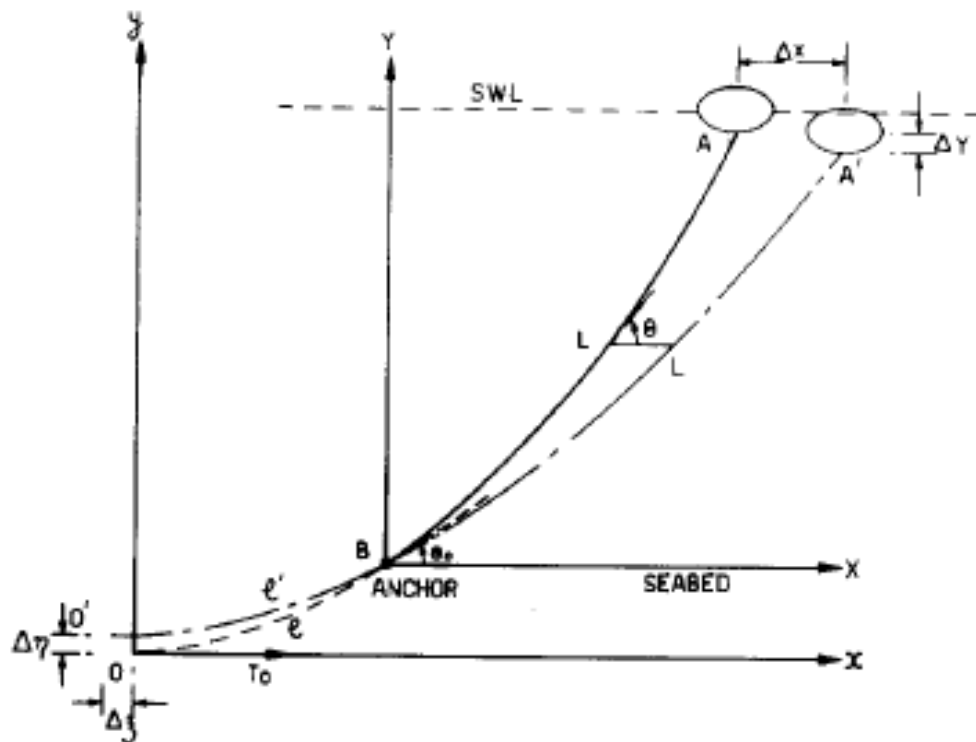
$T_a$  dan  $T_b$  merupakan tegangan tali di titik A dan titik B dengan Persamaan 4.31. dan 4.32. Perhitungan kekakuan tali tambat dapat dilihat di Tabel 4.49.

$$T_A = T_o \left[ 1 + \left( \frac{w L'}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.31)$$

$$T_B = T_o \left[ 1 + \left( \frac{w l}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.32)$$

**Tabel 4.49.** Kekakuan mode gerak *pitch*

K55		
Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
<b>K55 Total</b>	<b>23060196272.604</b>	<b>N</b>

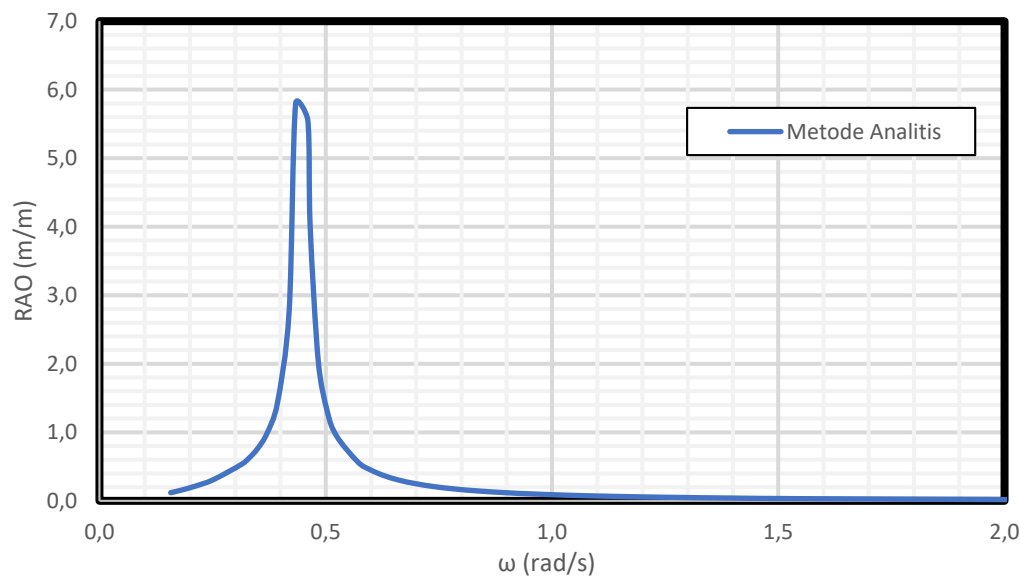


**Gambar 4.57.** Titik bayangan. (Jain, 1980)

#### 4.6.2. Metode Analitis

##### 1. Mode Gerak *Surge*

Tabel 4.45 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *surge*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *surge* tertambat dihitung dengan metode analitis. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN E. Gambar 4.58 merupakan grafik RAO *surge*. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 5.796 m/m pada frekuensi 0.433 rad/s.



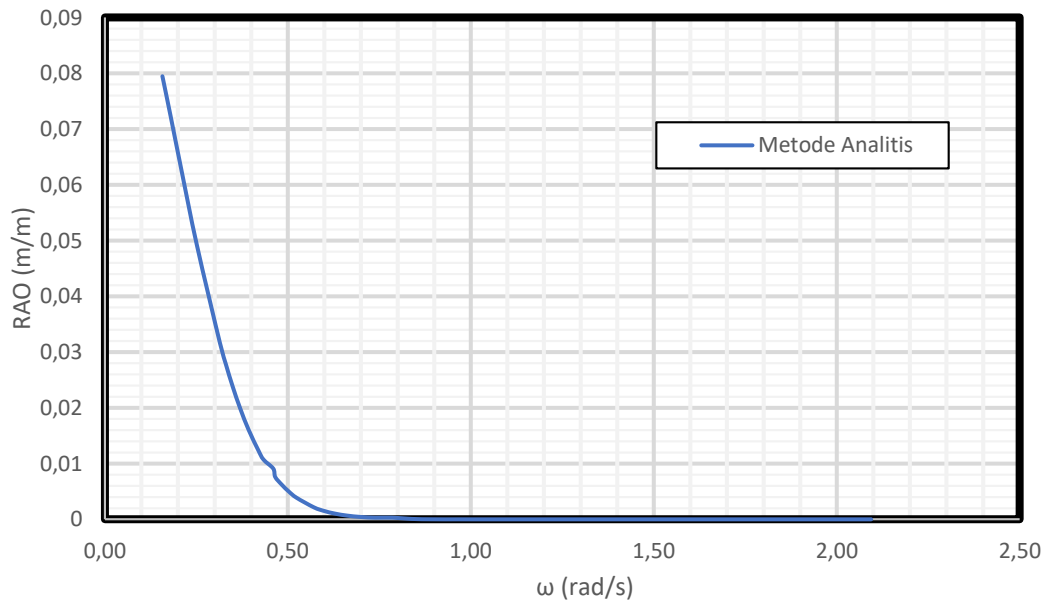
**Gambar 4.58.** RAO *Surge* tertambat metode analitis

## 2. Mode Gerak *Heave*

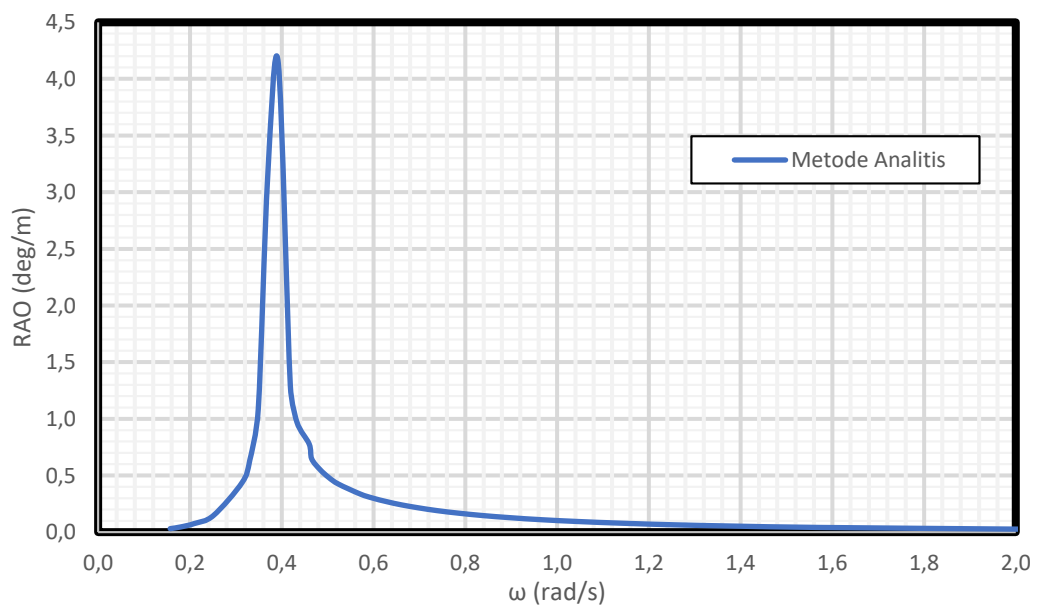
Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *heave* setiap tali tambat. Tabel 4.48 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total. Dengan menggunakan metode yang sama seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *heave* tertambat dengan metode analitis dapat dihitung. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN E. Gambar 4.59 merupakan grafik RAO *Heave* tertambat. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara analitis sebesar 0.079 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s.

## 3. Mode Gerak *Pitch*

Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *pitch* setiap tali tambat. Tabel 4.49 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *pitch*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti sub-bab, maka RAO dari *pitch* tertambat dengan metode analitis. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN E. Gambar 4.60. merupakan grafik RAO *pitch* tertambat. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara analitis sebesar 4.138 deg/m pada frekuensi 0.393 rad/s.



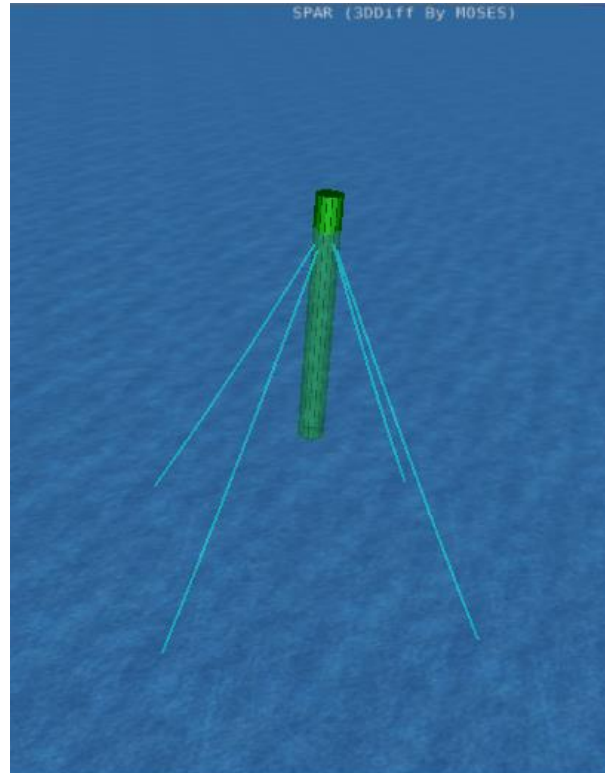
**Gambar 4.59.** RAO *heave* tertambat metode analitis



**Gambar 4.60.** RAO *Pitch* tertambat metode analitis

#### 4.6.3. Metode Numeris

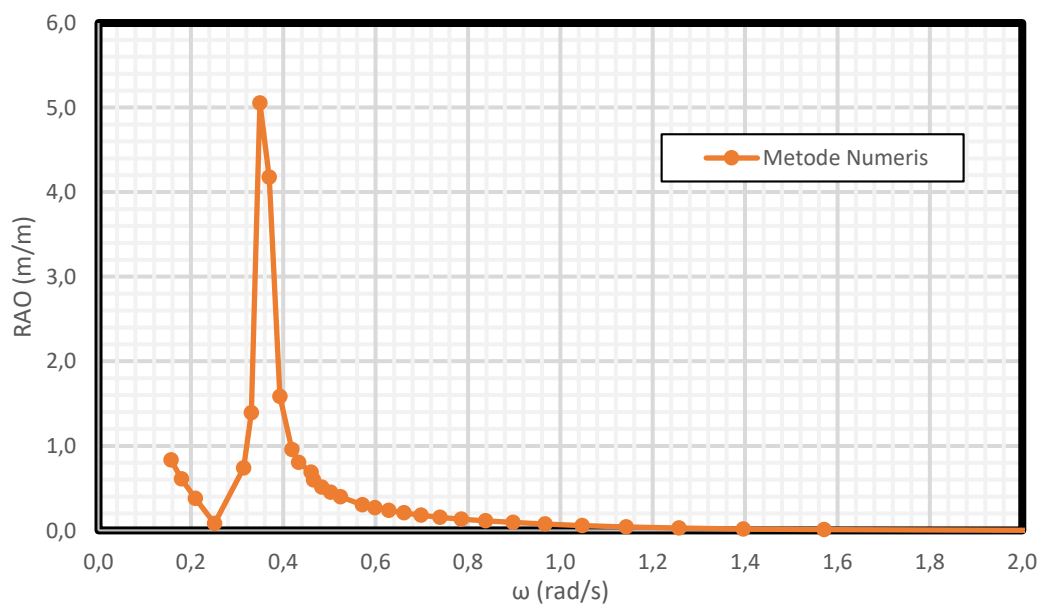
Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Metode yang digunakan mirip dengan kondisi terapung bebas, tetapi dengan penambahan tali tambat dan parameternya. Dalam analisa numeris dilakukan perhitungan dari arah datang gelombang 0 derajat.



**Gambar 4.61.** Kondisi tertambat dalam MOSES

#### 1. Mode Gerak *Surge*

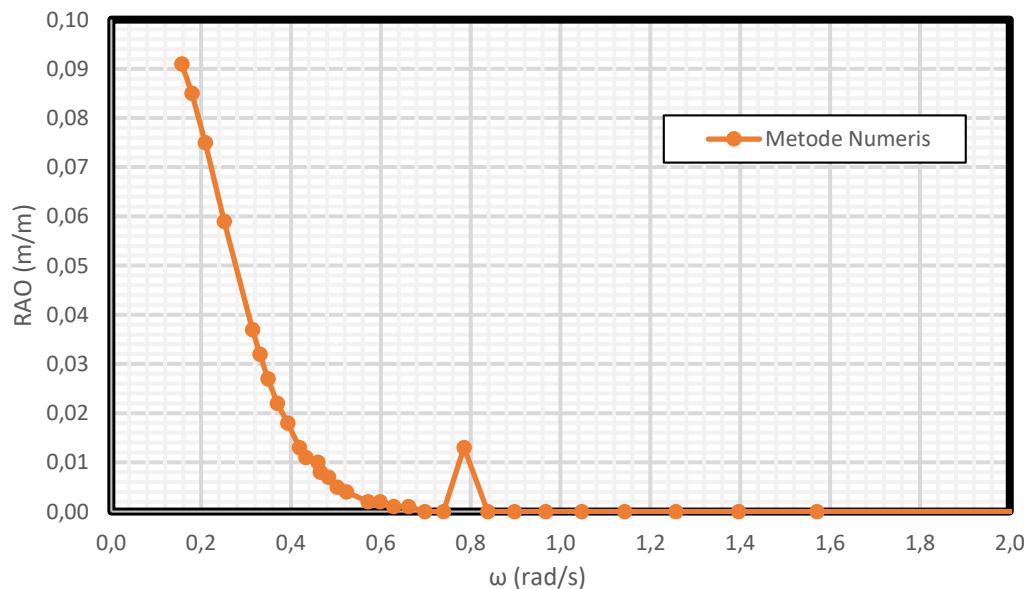
Gambar 4.62 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat.. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara numeris sebesar 5.053 m/m pada frekuensi 0.349 rad/s.



**Gambar 4.62.** RAO *surge* tertambat metode numerik

## 2. Mode Gerak *Heave*

Gambar 4.63 menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara numeris sebesar 0.091 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s.



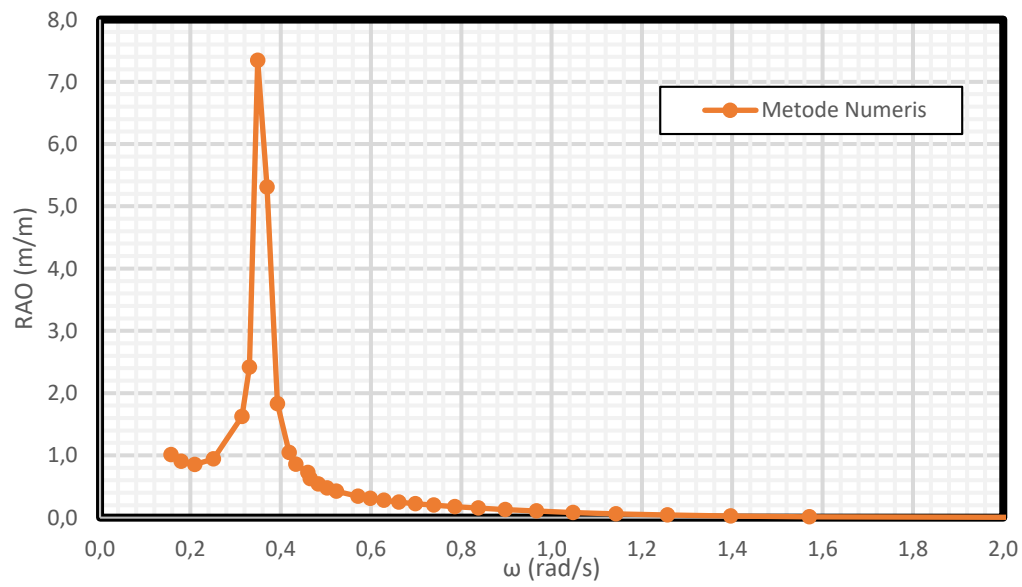
**Gambar 4.63.** RAO *heave* tertambat metode numerik

## 3. Mode Gerak *Pitch*

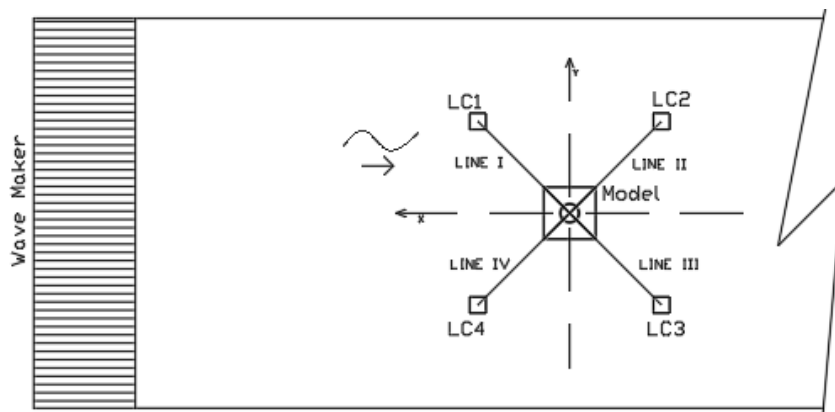
Gamba 4.64 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada . RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara numeris sebesar 7.344 deg/m pada frekuensi 0.349 rad/s.

### 4.6.4. Metode Eksperimen

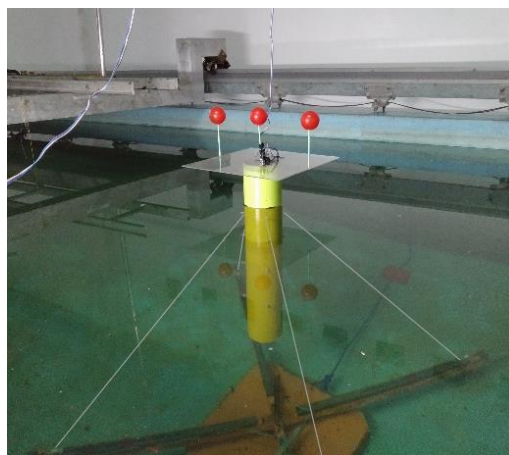
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.65. SPAR dalam kondisi tertambat di laboratorium Hidrodinamika ITS ditunjukkan pada Gambar 4.66.



**Gambar 4.64.** RAO *pitch* tertambat metode numerik



**Gambar 4.65.** Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat



**Gambar 4.66.** Ekseperimen SPAR Tertambat

Tali tambat yang digunakan sebanyak empat buah yang diatur dengan panjang yang sama dan tali dipasang dalam kondisi *taut*. Tali tambat dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar yang telah berada di dasar kolam untuk mencatat tegangan tali yang terjadi.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.50. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan tinggi gelombang konstan. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.

Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.67, 4.68 dan 4.69 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen.

**Tabel 4.50.** Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan

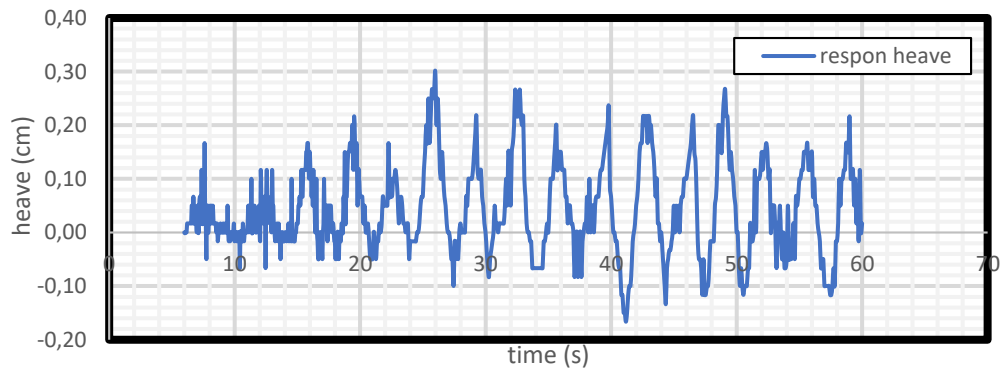
No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1	40	3.6	2.5
2	TT2	35	3.1	
3	TT3	30	2.7	
4	TT4	25	2.2	
5	TT5	20	1.8	
6	TT6	18	1.6	
7	TT7	16	1.4	
8	TT8	15	1.3	
9	TT9	10	0.9	

#### 1. Mode Gerak *Surge*

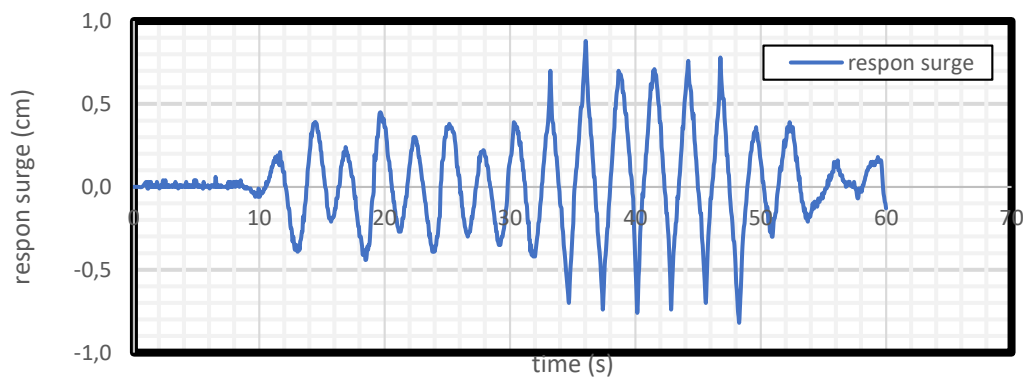
Setiap time history pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon



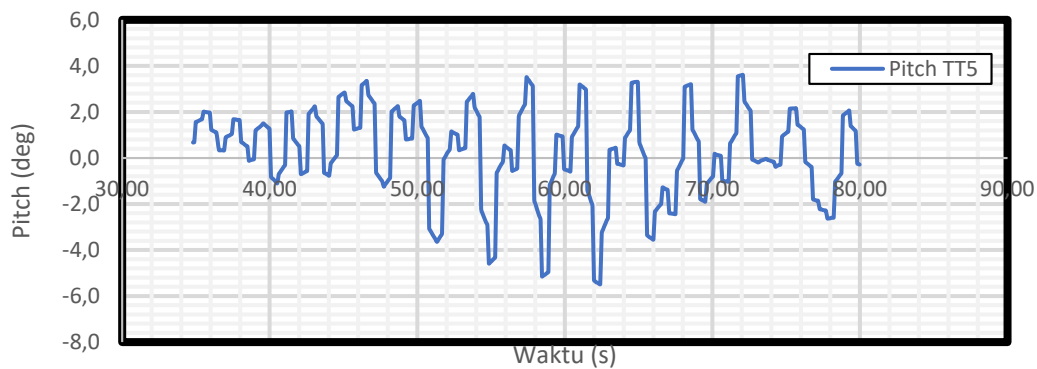
yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Periode respon dibandingkan dengan periode gelombang datang. Tabel 4.51 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *surge*.



**Gambar 4.67.** *Time history instrumen image processing untuk gerakan heave tertambat*



**Gambar 4.68.** *Time history instrumen image processing untuk gerakan surge tertambat*

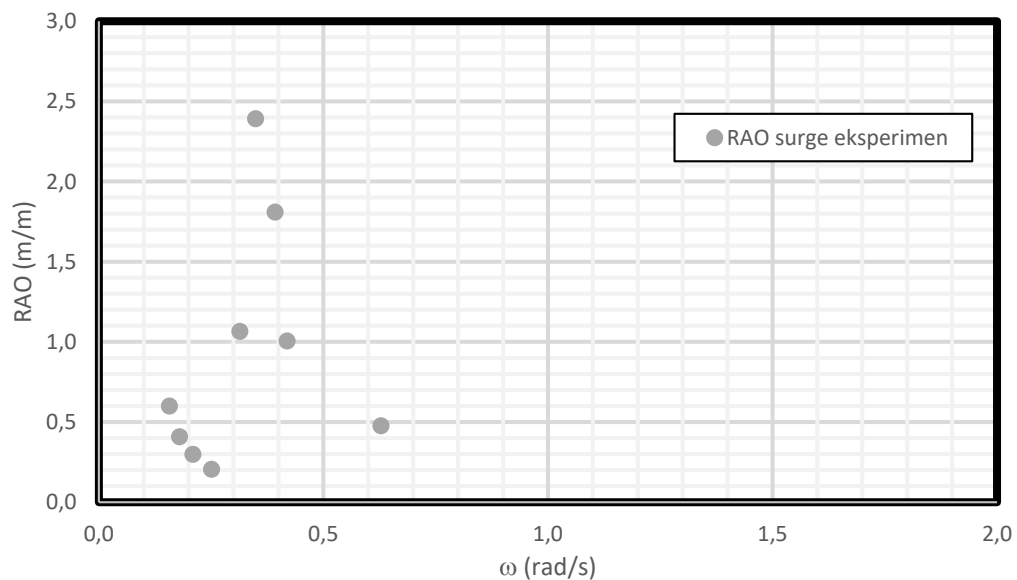


**Gambar 4.69.** *Time History instrumen gyroscope untuk gerakan pitch tertambat*

**Tabel 4.51.** Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen kondisi tertambat

No.	Kode	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	1.49	3.33	0.60	1.08
2	TT2	1.02	3.33	0.41	1.07
3	TT3	0.75	2.86	0.30	1.06
4	TT4	0.52	2.22	0.21	1.01
5	TT5	2.66	2.00	1.07	1.11
6	TT6	5.98	1.67	2.39	1.04
7	TT7	4.53	1.43	1.81	1.02
8	TT8	2.52	1.25	1.01	1.04
9	TT9	1.19	0.83	0.48	1.08

Kolom RAO pada Tabel 4.51 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.70. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara eksperimen sebesar 2.390 m/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



**Gambar 4.70.** Grafik RAO *surge* tertambat eksperimen

## 2. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.52 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Kolom RAO pada Tabel 4.52 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *heave* model tertambat yang disajikan pada gambar 4.71. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara eksperimen sebesar 0.069 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.

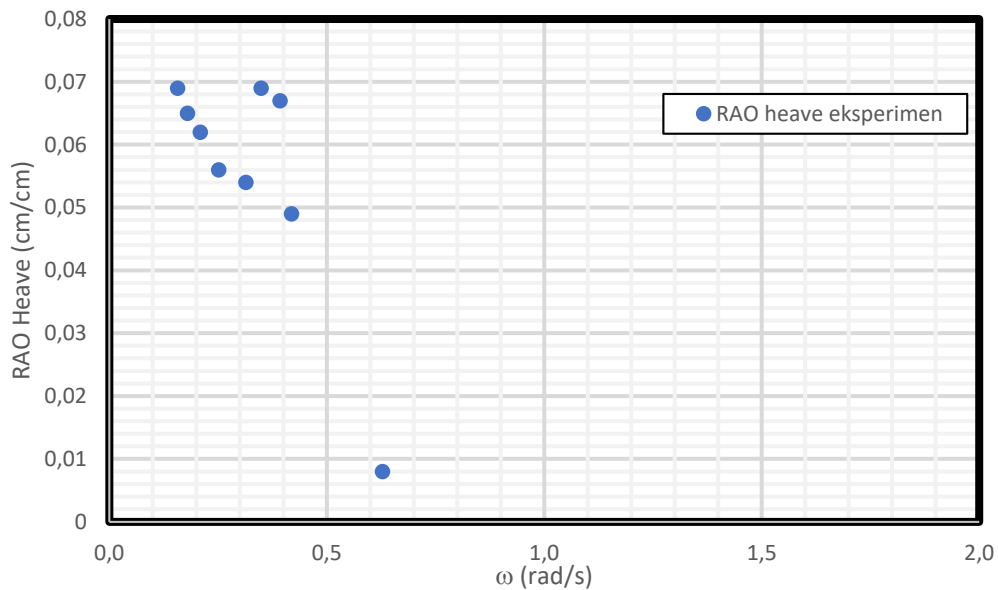
**Tabel 4.52.** Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen kondisi tertambat

No.	Kode	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	0,348	3,75	0,069	1,04
2	TT2	0,163	3,38	0,065	1,09
3	TT3	0,154	2,86	0,062	1,06
4	TT4	0,142	2,19	0,056	1,00
5	TT5	0,135	1,79	0,054	1,00
6	TT6	0,174	1,59	0,069	1,00
7	TT7	0,168	1,58	0,067	1,13
8	TT8	0,123	1,48	0,049	1,14
9	TT9	0,019	0,83	0,008	1,084

## 3. Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.53 menunjukkan respon gerak *pitch* dan periode respon

struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

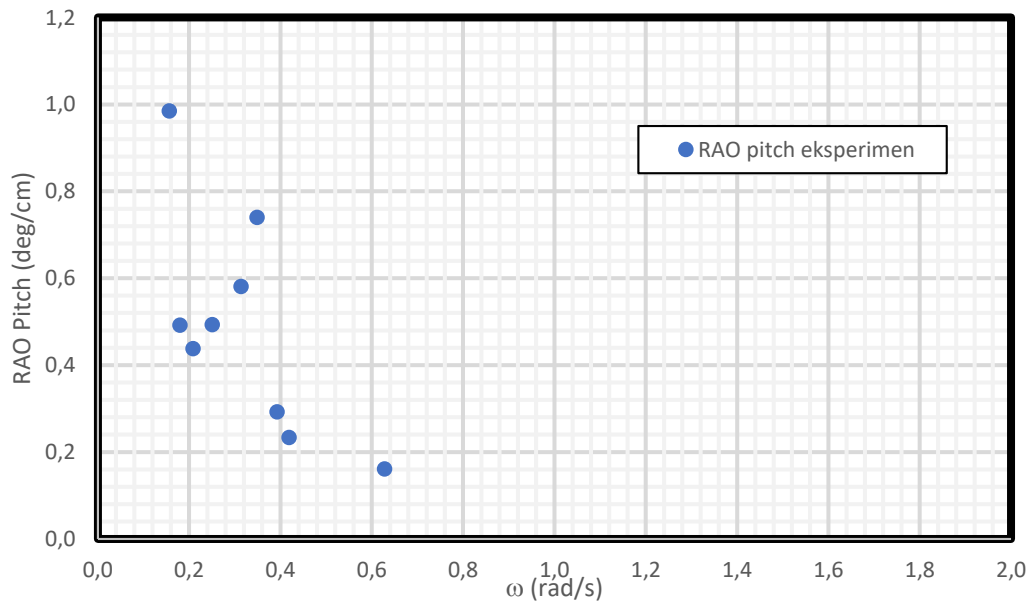


**Gambar 4.71.** Grafik RAO *heave* tertambat eksperimen

**Tabel 4.53.** Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	2,464	3,88	0,985	1,08
2	TT2	1,231	3,88	0,492	1,25
3	TT3	1,096	2,74	0,438	1,01
4	TT4	1,233	2,33	0,493	1,06
5	TT5	1,452	1,86	0,581	1,03
6	TT6	1,851	1,66	0,74	1,04
7	TT7	0,73	1,45	0,292	1,04
8	TT8	0,582	1,33	0,233	1,02
9	TT9	0,403	0,93	0,161	1,03

Kolom RAO pada Tabel 4.53 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *pitch* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.72. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara eksperimen sebesar 0.985 deg/m pada frekuensi 0.16 rad/s, namun di frekuensi 0.35 rad/s juga terdapat RAO cukup tinggi sebesar 0.740.



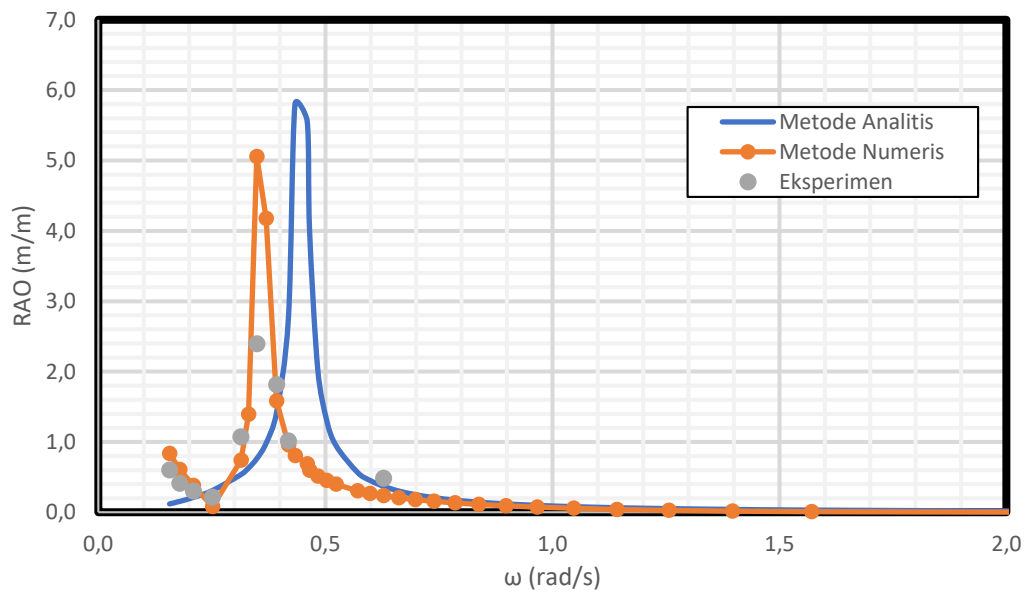
**Gambar 4.72.** Grafik RAO *pitch* tertambat eksperimen

#### 4.6.5. Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.73, 4.74 dan 4.75 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

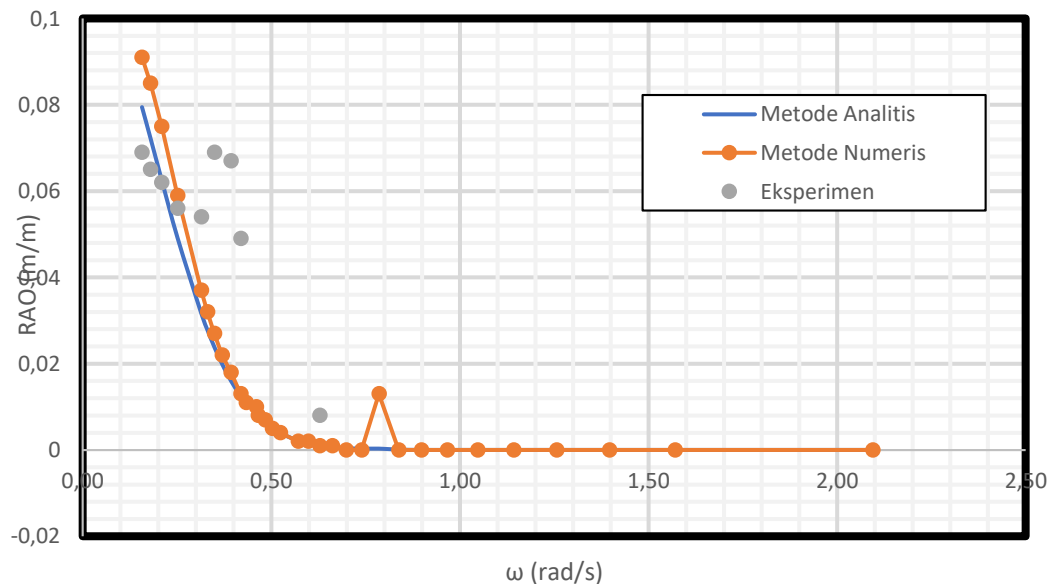
**Tabel 4.54.** Perbandingan RAO *surge* tertambat

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.433	5.796
Numeris	0.349	5.053
Eksperimen	0.349	2.390



**Gambar 4.73.** Perbandingan RAO *surge* tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.54 menunjukkan perbandingan RAO *surge* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Metode numeris dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, 0.35 rad/s. RAO terbesar terjadi di perhitungan analitis sebesar 5.796 m/m.

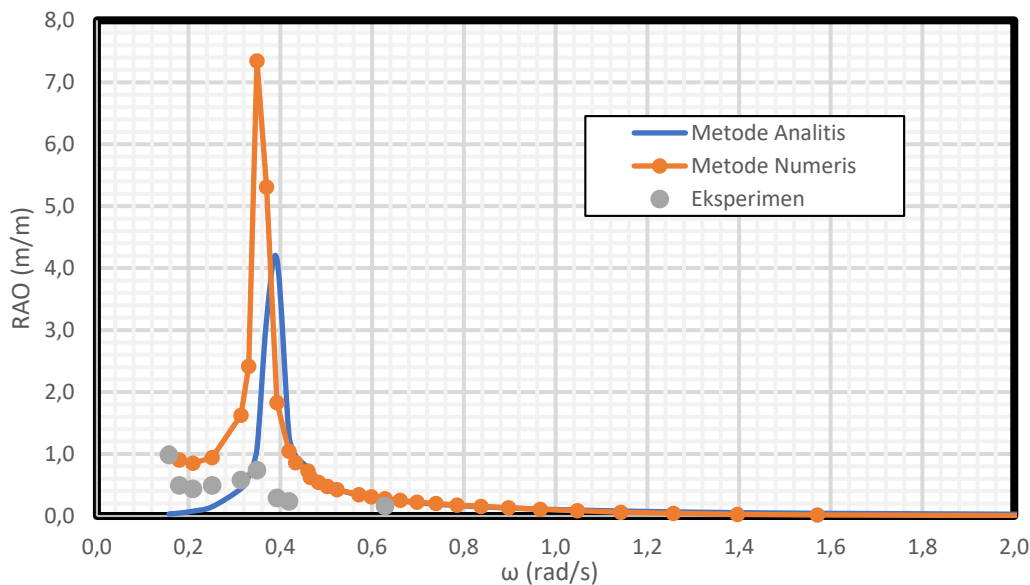


**Gambar 4.74.** Perbandingan RAO *heave* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen

Gerak *heave* tertambat terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam Tabel 4.55. Metode analitis menghasilkan nilai RAO paling tinggi dengan frekuensi di 0.16 rad/s. 3 metode memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama, dengan RAO *surge* analitis sebesar 0.083 m/m numeris sebesar 0.091 m/m dan eksperimen sebesar 0.069 m/m.

**Tabel 4.55.** Perbandingan RAO *heave* tertambat

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.157	0.079
Numeris	0.157	0.091
Eksperimen	0.157	0.069



**Gambar 4.75.** Perbandingan RAO *pitch* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen

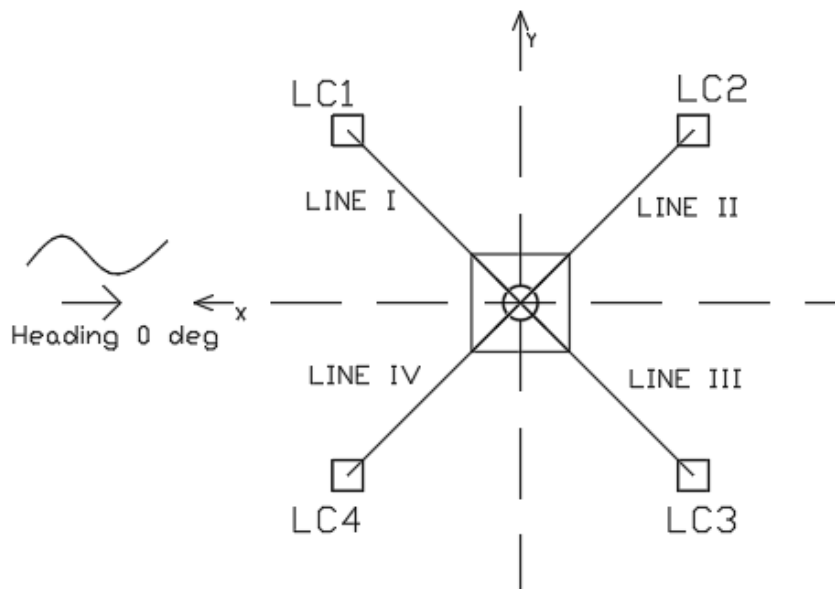
Gerak *pitch* terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam Tabel 4.56. Metode numeris menghasilkan nilai RAO paling tinggi sebesar 7.344 deg/m dengan frekuensi di 0.35 rad/s Metode numeris dan eksperimen memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama di 0.35 rad/s dengan RAO *pitch* analitis sebesar 4.138 deg/m dan eksperimen sebesar 0.740 deg/m

**Tabel 4.56.** Perbandingan RAO *pitch* tertambat

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Analitis	0.392	4.138
Numeris	0.349	7.344
Eksperimen	0.349	0.740

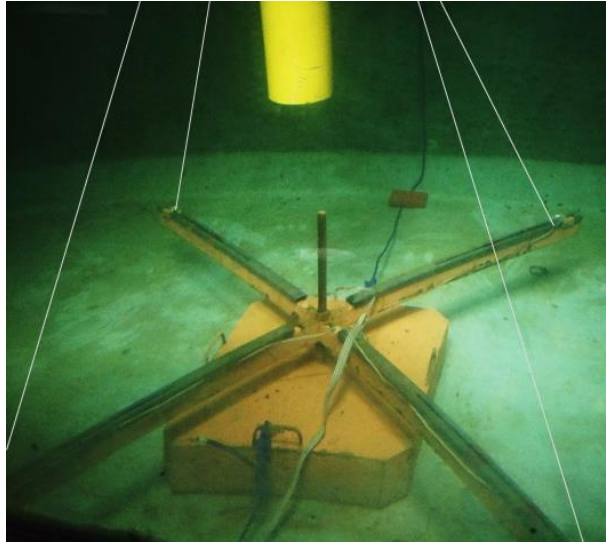
#### 4.7. TEGANGAN TALI

Tali tambat pada struktur akan mengalami gaya tarik yang besarnya berosilasi sesuai dengan gaya gelombang yang terjadi. Besar gaya tegangan tali yang terjadi diukur dengan menggunakan dua metode yaitu metode numeris dan metode eksperimen. Tegangan tali yang diukur menggunakan metode numeris dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7, sedangkan untuk metode eksperimen tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load cell* yang mampu mencatat gaya tarik yang terjadi pada tali tambat. Properties tali tambat yang digunakan mengacu pada Tabel 4.18. Gambar 4.76 merupakan posisi tali tambat yang digunakan pada model baik untuk metode numeris maupun metode eksperimen. Gambar 4.77 merupakan *load cell* yang berada di dasar air kolam uji Laboratorium Hidrodinamika ITS.



**Gambar 4.76.** Posisi *Line I, II, II dan IV*





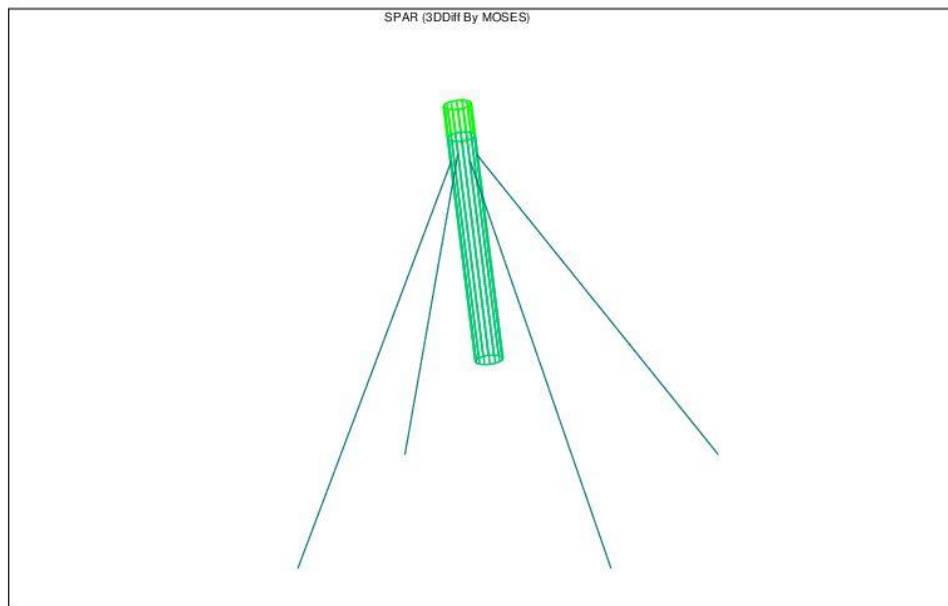
**Gambar 4.77.** Kondisi *Load cell* dalam air

#### 4.7.1. Metode Numeris

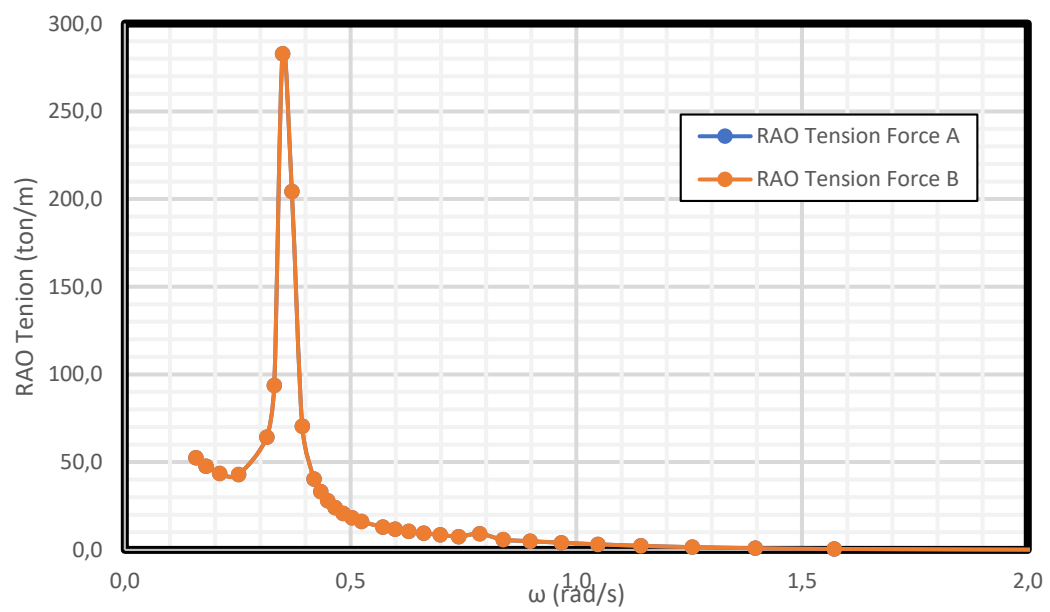
Tegangan tali yang terjadi pada struktur dianalisa menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7. Properties tali tambat yang ada pada Tabel 4.18 dimasukkan pada program MOSES EDITOR sehingga dihasilkan respon tegangan tali yang terjadi dalam bentuk *RAO Tension Force Mooring Line*. Gambar 4.78 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan MOSES EDITOR. Gambar 4.79 dan 4.80 menunjukkan grafik hasil *RAO Tension Force* dari tiap tali tambat yang digunakan. Dari grafik dapat dilihat bahwa *Tension Force* yang terjadi pada tali tambat I dan tali tambat IV besarnya sama, sedangkan tali tambat II besarnya sama dengan tali tambat III namun lebih kecil dari tali tambat I dan IV. Tabel 4.57 menunjukkan tegangan maksimum pada tiap tali tambat dari hasil MOSES EDITOR.

**Tabel 4.57.** *Tension Force* maksimum tiap tali tambat pada MOSES

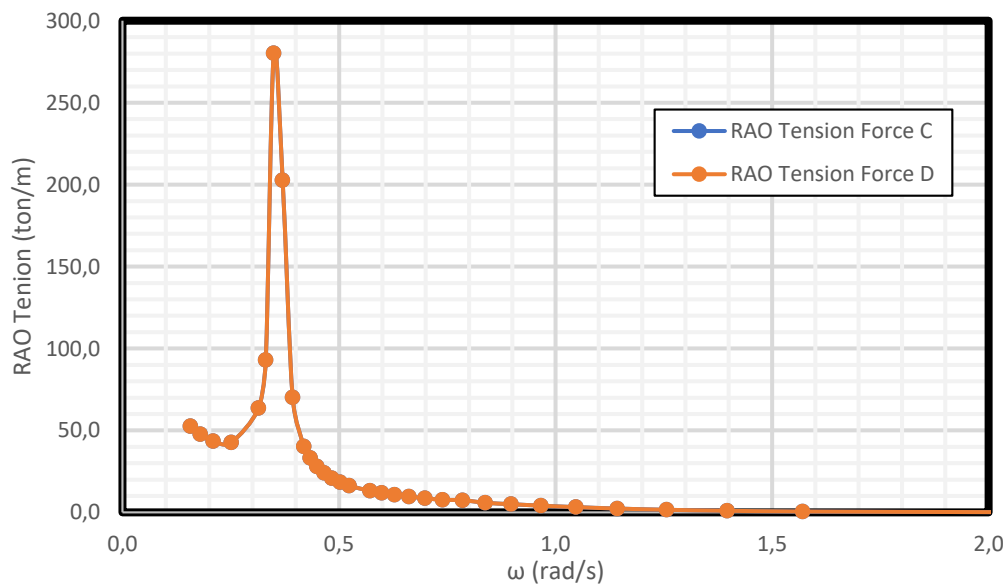
	Frekuensi (rad/s)	<i>Tension Force</i> (ton/m)
<b>Mooring Line 1</b>	0.349	282.86
<b>Mooring Line 2</b>	0.349	280.18
<b>Mooring Line 3</b>	0.349	280.17
<b>Mooring Line 4</b>	0.349	282.87



**Gambar 4.78.** Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR



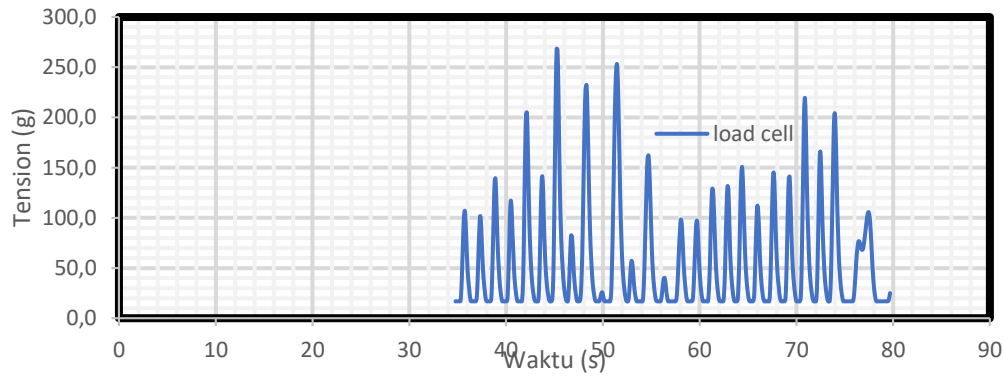
**Gambar 4.79.** RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik



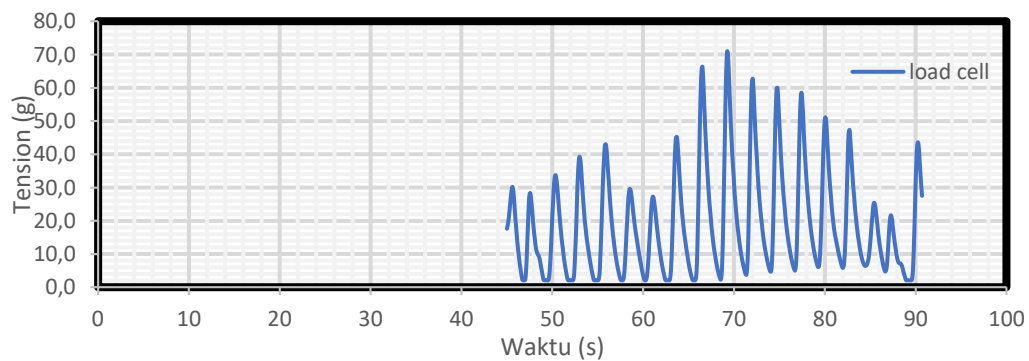
**Gambar 4.80.** RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik

#### 4.7.2. Metode Eksperimen

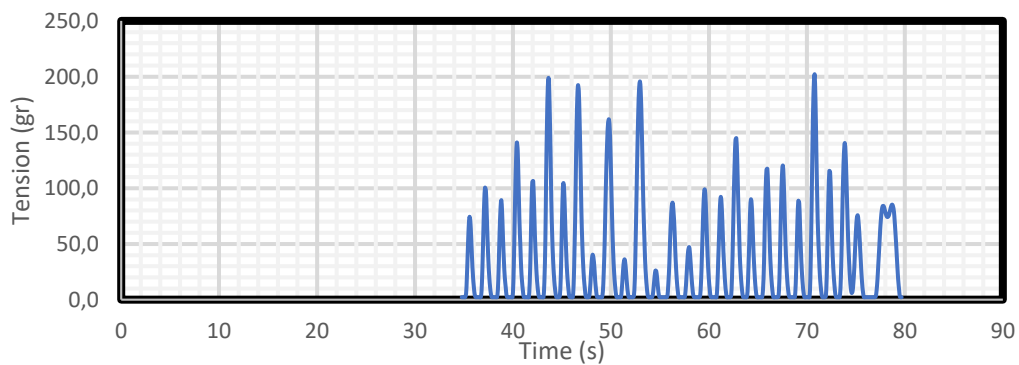
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.76 dengan menggunakan empat buah tali tambat. *Load cell* dengan kapasitas beban tarik 5 kg digunakan pada tiap tali tambat yang dipasang pada model fisik. Model fisik akan diberi beban gelombang dengan arah 0 derajat yang berasal dari *wave maker* dan diberi beban 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.50. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan. Respon tegangan tali tambat yang terjadi akibat beban gelombang akan dicatat dengan instrumen *load cell*. Gambar 4.81, 4.82, 4.83 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen *load cell*. Akan tetapi, pada tali tambat 2 *load cell* mengalami kerusakan sehingga menghasilkan data yang tidak akurat dan tidak dapat digunakan. Namun, hal ini tidak menjadi masalah karena tali tambat 2 dan tali tambat 3 yang letaknya simetri akan menghasilkan respon tegangan yang sama sehingga dapat diwakilkan dengan menggunakan hasil data pada *load cell* tali tambat 3.



**Gambar 4.81.** *Time history instrumen load cell tali tambat 1*



**Gambar 4.82.** *Time History instrumen load cell tali tambat 3*



**Gambar 4.83.** *Time history instrumen load cell tali tambat 4*

#### 1. *Load cell 1*

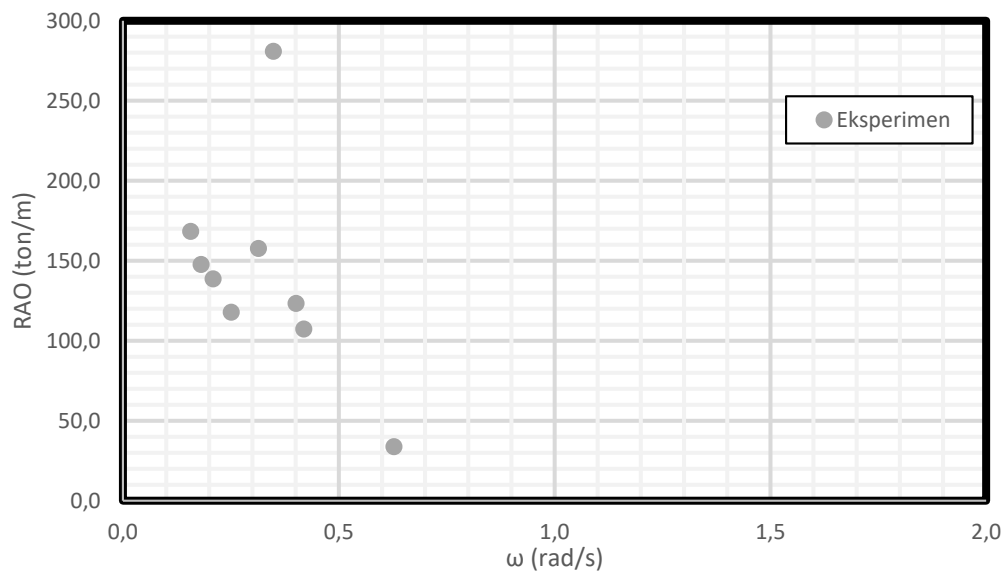
Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell 1* dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. RAO tegangan merupakan perbandingan amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.58 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan

beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

**Tabel 4.58.** Data *load cell* 1 hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	27,456	3,88	168,34	1,08
2	TT2	24,08	3,32	147,64	1,07
3	TT3	22,607	2,91	138,61	1,08
4	TT4	19,226	2,33	117,88	1,06
5	TT5	25,727	1,86	157,74	1,03
6	TT6	45,808	1,52	280,86	1,05
7	TT7	20,12	1,37	123,36	0,98
8	TT8	17,501	1,42	107,30	1,09
9	TT9	5,527	0,85	33,89	1,05

Kolom RAO pada Tabel 4.58 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line I* yang disajikan pada Gambar 4.84.



**Gambar 4.84.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 1 hasil eksperimen

## 2. *Load cell 2*

*Load cell 2* yang terpasang pada jangkar mengalami kerusakan saat pengambilan data, sehingga tidak terdapat data yang dapat dianalisa. Namun, representasi *load cell 2* dapat diwakilkan oleh *load cell 3*, karena konfigurasi yang simetris.

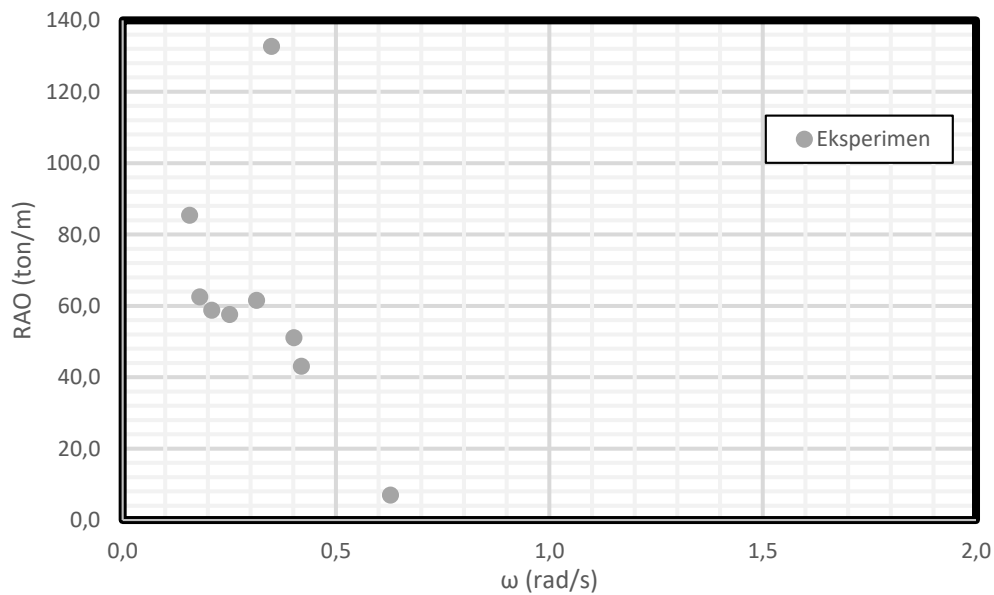
## 3. *Load cell 3*

Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell 3* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari tegangan yang terjadi. RAO *tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.59 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

**Tabel 4.59.** Data *load cell 3* hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	13,91	3,88	85,287	1,08
2	TT2	10,179	3,56	62,409	1,15
3	TT3	9,574	2,91	58,702	1,08
4	TT4	9,379	2,33	57,502	1,06
5	TT5	10,02	1,86	61,44	1,03
6	TT6	21,633	1,52	132,636	1,05
7	TT7	8,322	1,55	51,026	1,11
8	TT8	7,017	1,42	43,025	1,09
9	TT9	1,129	0,85	6,92	1,05

Kolom RAO pada Tabel 4.59 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat 3 yang disajikan pada gambar 4.85.



**Gambar 4.85.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 3 hasil eksperimen

#### 4. *Load cell* 4

Setiap *time history* pada tegangan tali tambat *load cell* 4 dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. RAO *tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tegangan tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.60 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

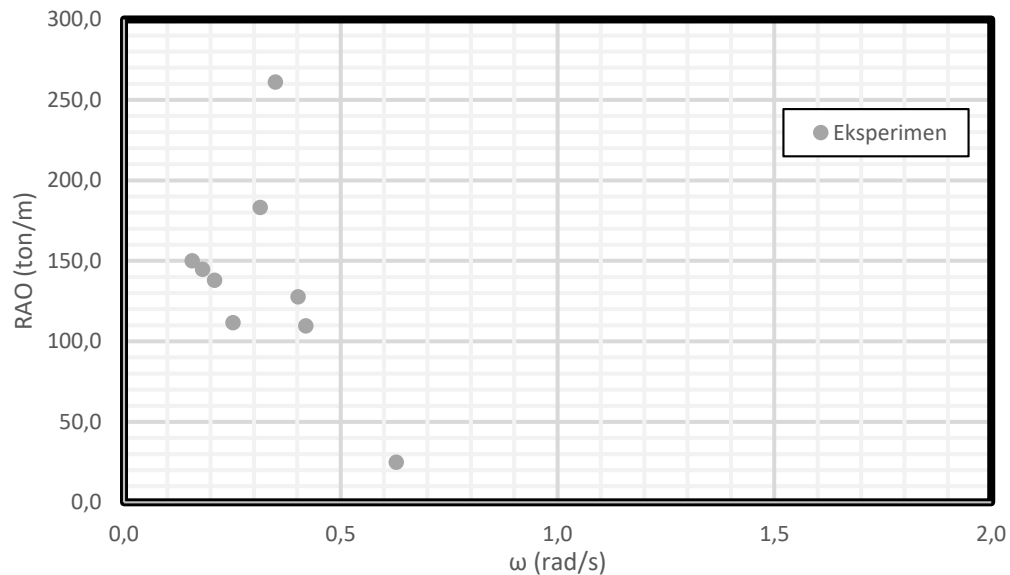
Kolom RAO pada Tabel 4.60 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat 4 yang disajikan pada Gambar 4.86.

**Tabel 4.60.** Respon tegangan dan RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen

No.	Kode	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	24,45	3,88	149,91	1,08
2	TT2	23,598	3,05	144,683	0,98
3	TT3	22,491	2,91	137,901	1,08
4	TT4	18,181	2,33	111,472	1,06

**Tabel 4.60.** Respon tegangan dan RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen (lanjutan)

No.	Kode	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
5	TT5	29,88	1,86	183,199	1,03
6	TT6	42,584	1,52	261,090	1,05
7	TT7	20,817	1,45	127,634	1,04
8	TT8	17,869	1,42	109,558	1,09
9	TT9	4,043	0,85	24,791	1,05



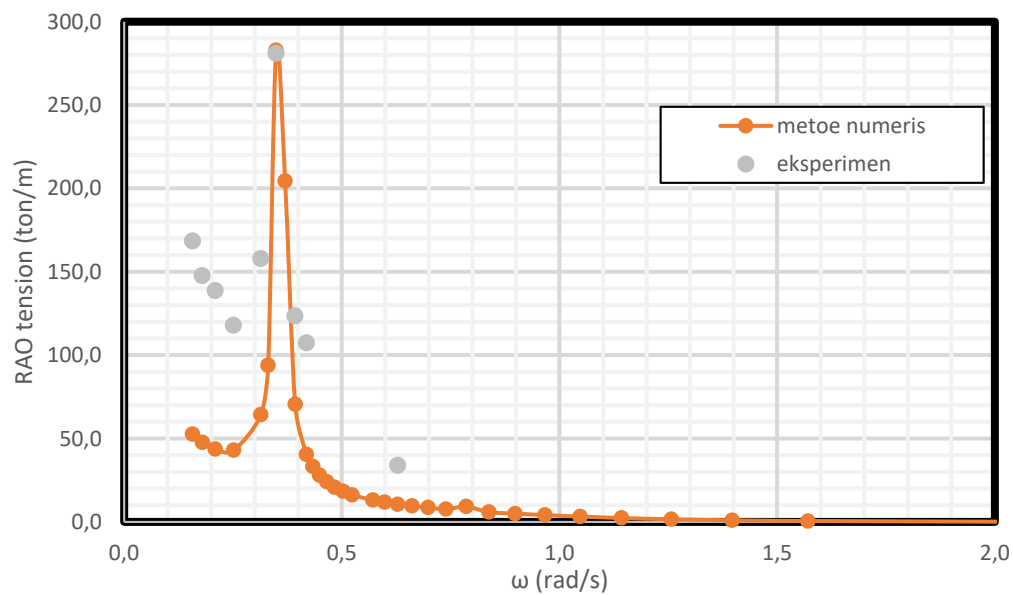
**Gambar 4.86.** Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen

#### 4.7.3. Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.87-4.90 menunjukkan perbandingan RAO Tali Tambat dari metode numerik dan metode eksperimen dari setiap *line* dengan arah gelombang 0 derajat.

Tegangan tali pada *Line* I dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.61. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (282.86 ton) daripada RAO eksperimen (280.863 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.





**Gambar 4.87.** Perbandingan RAO *Tension line I* tertambat metode numeris dan eksperimen

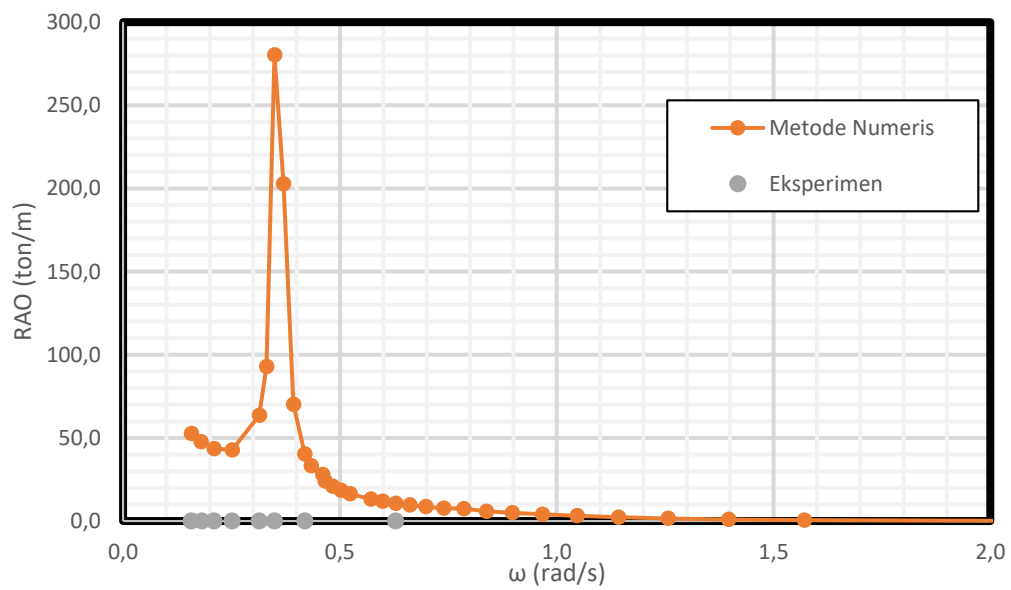
**Tabel 4.61.** Perbandingan *Tension Line I*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	282.860
Eksperimen	0.349	280.863

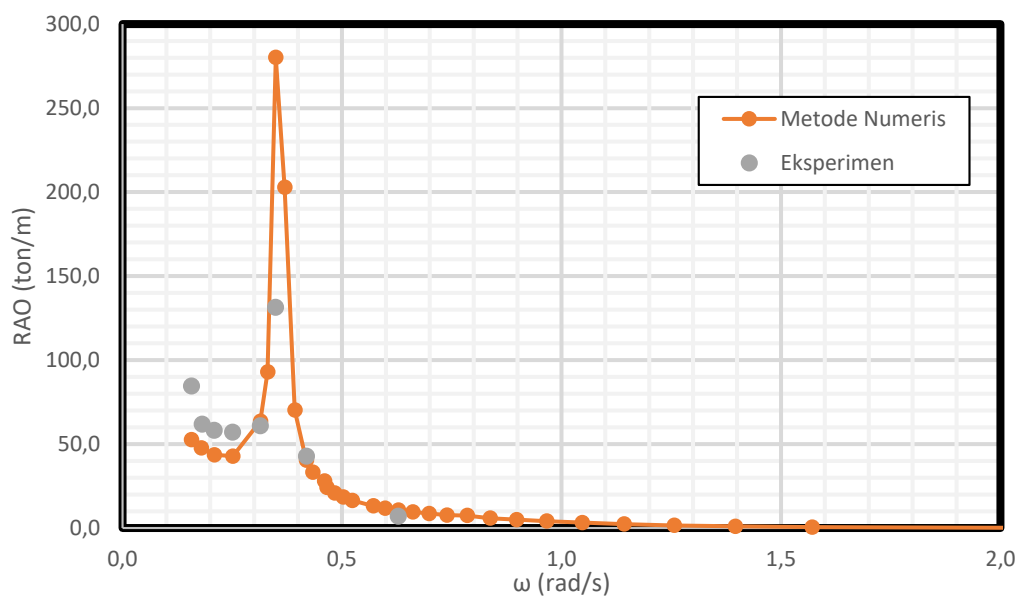
Tegangan tali pada *Line II* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.62. Pada *Line II*, *load cell* mengalami kerusakan sehingga tidak ada data yang dapat dianalisa. Metode numeris menghasilkan RAO sebesar 280.180 ton di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.62.** Perbandingan *Tension Line II*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.180
Eksperimen	-	-



**Gambar 4.88.** Perbandingan RAO *Tension line II* tertambat metode numeris dan eksperimen



**Gambar 4.89.** Perbandingan RAO *Tension line III* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tegangan tali pada *Line III* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.63. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (280.170 ton) daripada RAO eksperimen (132.636 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

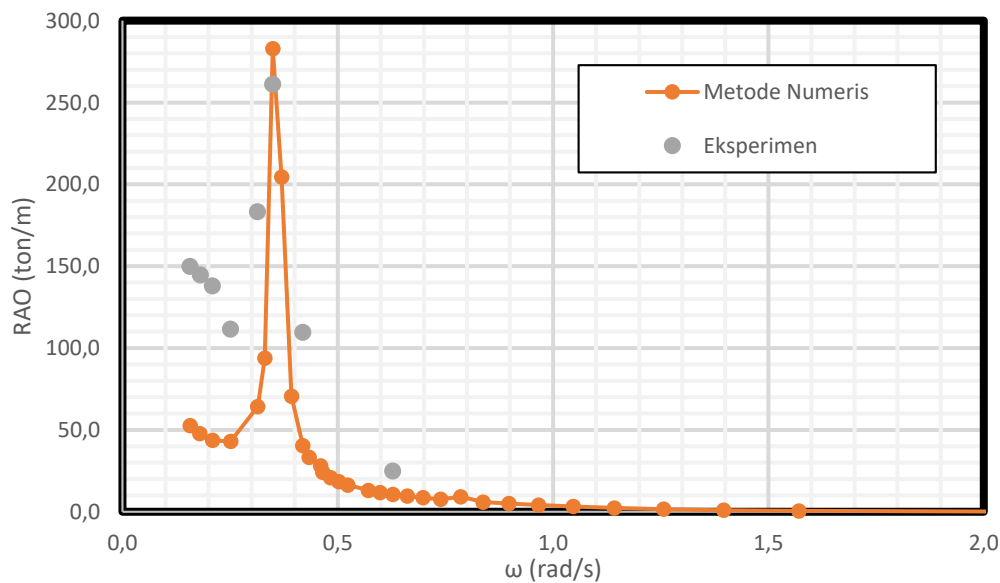
**Tabel 4.63.** Perbandingan *Tension Line III*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.170
Eksperimen	0.330	132.636

Tegangan tali pada *Line IV* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.64. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (282.87 ton/m) daripada RAO eksperimen (261.09 ton/m). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

**Tabel 4.64.** Perbandingan *Tension Line IV*

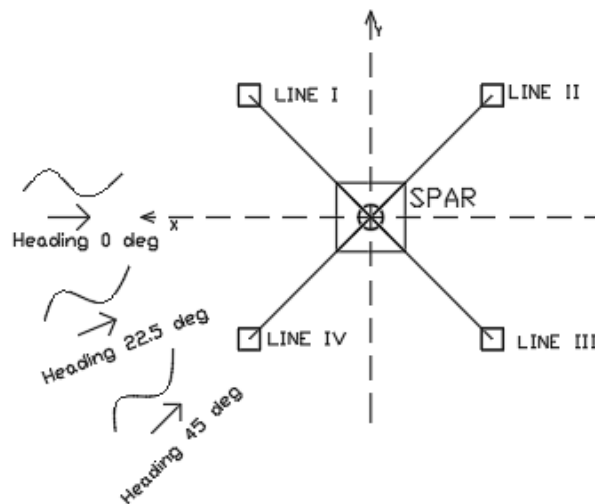
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	282.870
Eksperimen	0.330	261.090



**Gambar 4.90.** Perbandingan RAO *Tension line IV* tertambat metode numeris dan eksperimen

#### 4.8. STUDI PARAMETRIS

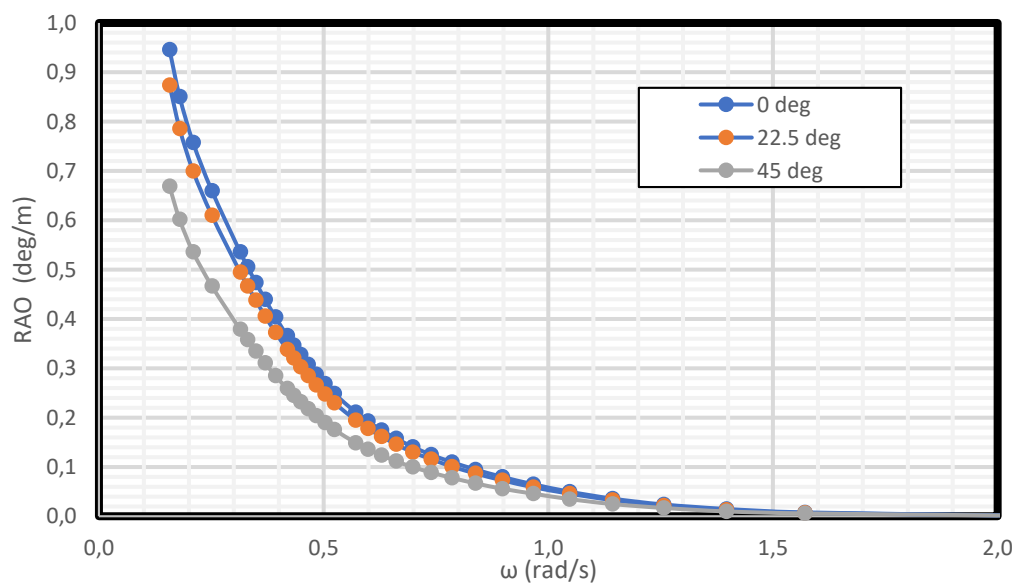
Pada Tugas Akhir kali ini, MOSES digunakan untuk menghitung gerak kondisi free floating, gerak dalam kondisi tertambat dan tegangan tali dengan variasi parameterik berupa arah datang gelombang (0°, 22.5 ° dan 45°) seperti Gambar 4.91. Hasil studi parametris dapat dilihat di LAMPIRAN F dan LAMPIRAN G



**Gambar 4.91.** Variasi *headingg* SPAR tertambat

#### 4.8.1. Gerak Free Floating

Pada gerak *surge*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.65. Gerak *surge* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.946 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s.



**Gambar 4.92.** Grafik RAO *surge* tertambat variasi *headingg*

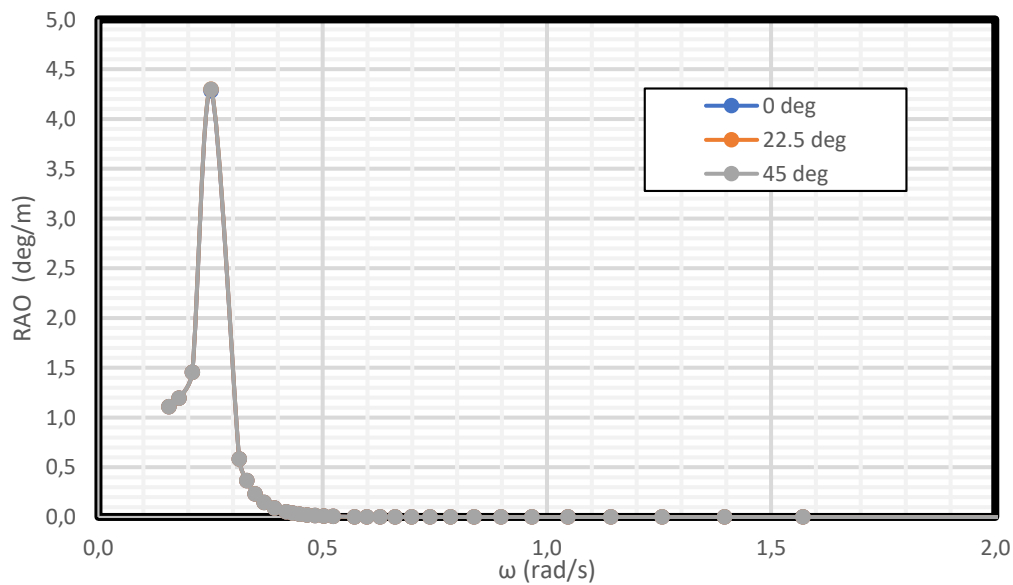
**Tabel 4.65.** Variasi *Heading* RAO *surge* terapung bebas

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.157	0.946

**Tabel 4.65.** Variasi *Heading* RAO *surge* terapung bebas (lanjutan)

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
22.5 deg	0.157	0.874
45 deg	0.157	0.669

Pada gerak *heave*, arah datang gelombang tidak mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.66. Gerak *heave* terbesar didapat sebesar 4.297 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s.

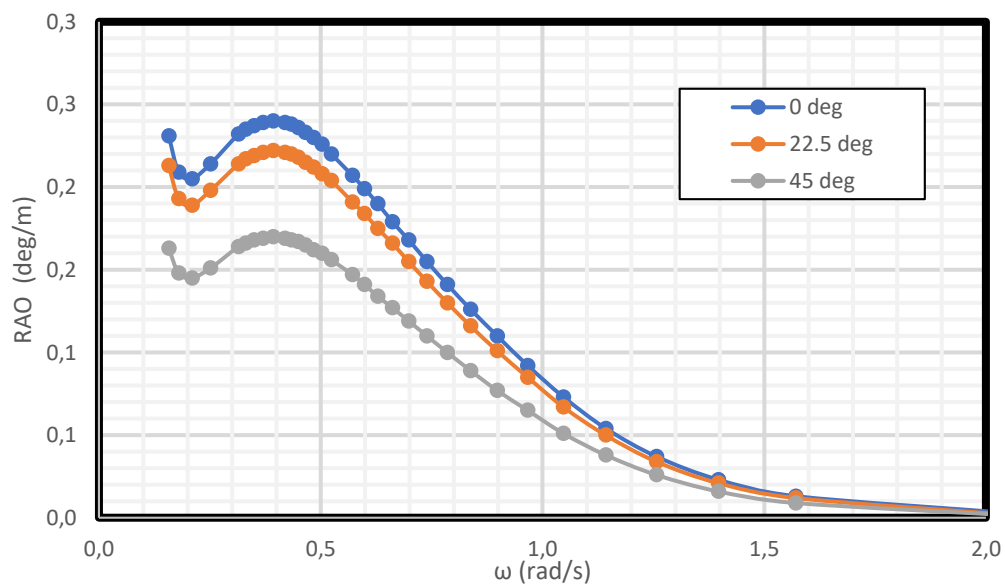


**Gambar 4.93.** Grafik RAO *heave* free floating variasi *headingg*

Pada gerak *pitch*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.67. Gerak *pitch* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.24 deg/m pada frekuensi 0.393 rad/s.

**Tabel 4.66.** Variasi *Heading* RAO *heave* terapung bebas

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.251	4.297
22.5 deg	0.251	4.297
45 deg	0.251	4.297



**Gambar 4.94.** Grafik RAO *pitch* tertambat variasi headingg

**Tabel 4.67.** Variasi *Heading* RAO *pitch* terapung bebas

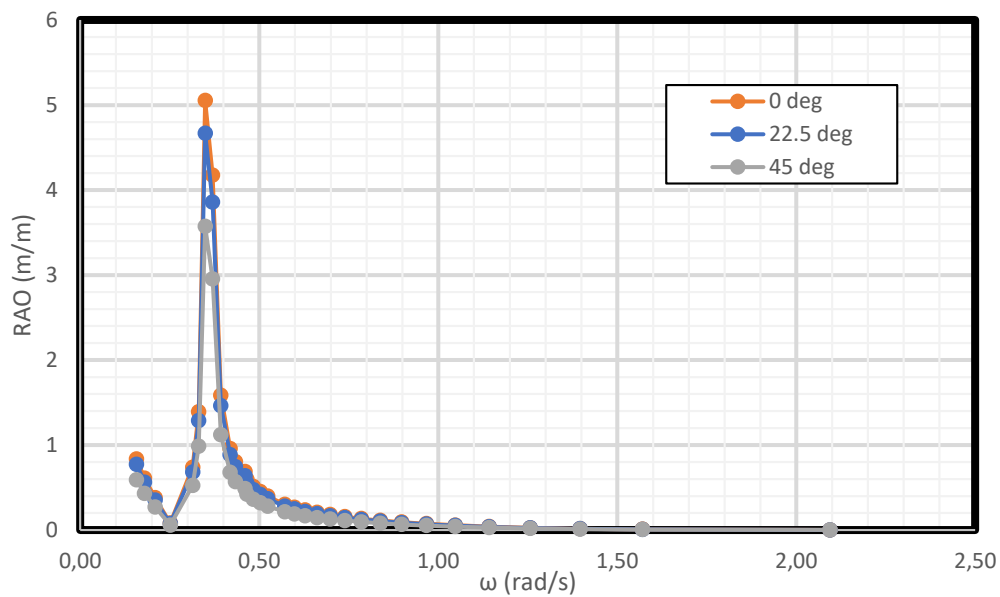
<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
0 deg	0.393	0.24
22.5 deg	0.393	0.22
45 deg	0.393	0.17

#### 4.8.2. Gerak Tertambat

Pada gerak *surge*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.68. Gerak *surge* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 5.053 m/m pada frekuensi 0.349 rad/s.

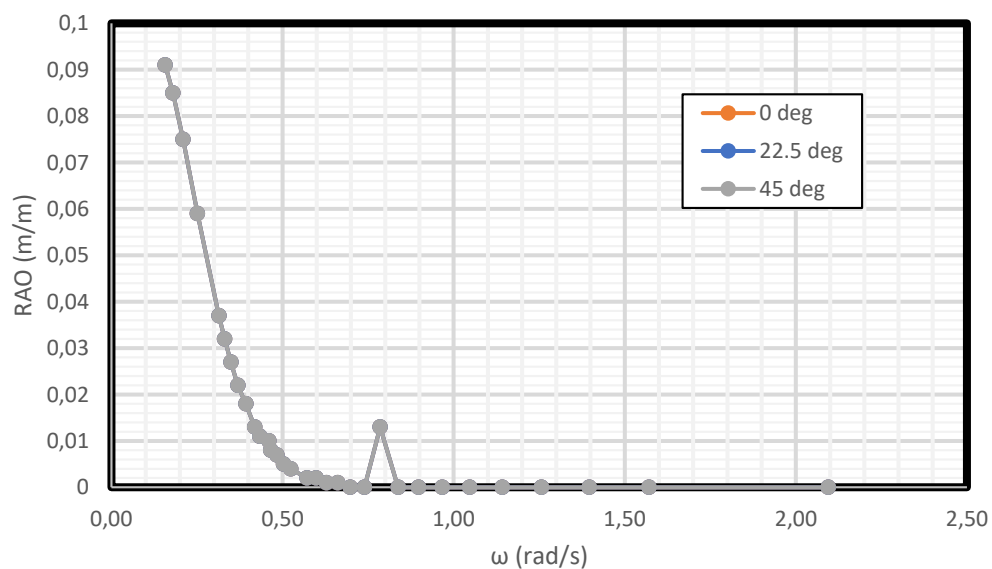
**Tabel 4.68.** Variasi *Heading* RAO *surge* tertambat

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.349	5.053
22.5 deg	0.349	4.668
45 deg	0.349	3.573



**Gambar 4.95.** Grafik RAO *surge* tertambat variasi *heading*

Pada gerak *heave*, arah datang gelombang tidak mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.69. Gerak *heave* terbesar didapat sebesar 0.091 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s.

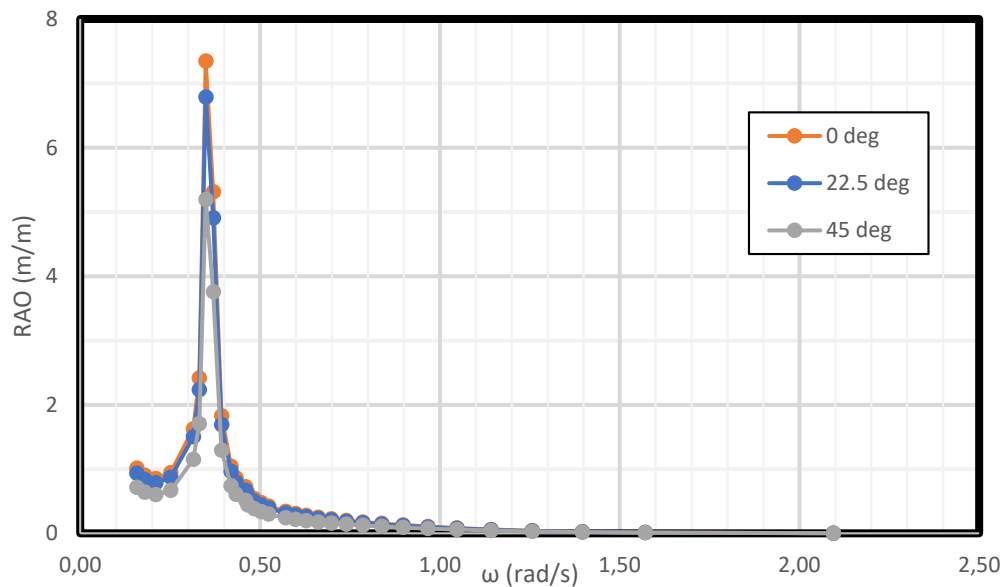


**Gambar 4.96.** Grafik RAO *heave* tertambat variasi *heading*

Pada gerak *pitch*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.70. Gerak *pitch* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 7.344 deg/m pada frekuensi 0.349 rad/s

**Tabel 4.69.** Variasi *Heading* RAO *heave* tertambat

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.157	0.091
22.5 deg	0.157	0.091
45 deg	0.157	0.091



**Gambar 4.97.** Grafik RAO *pitch* tertambat variasi *headingg*

**Tabel 4.70.** Variasi *Heading* RAO *pitch* tertambat

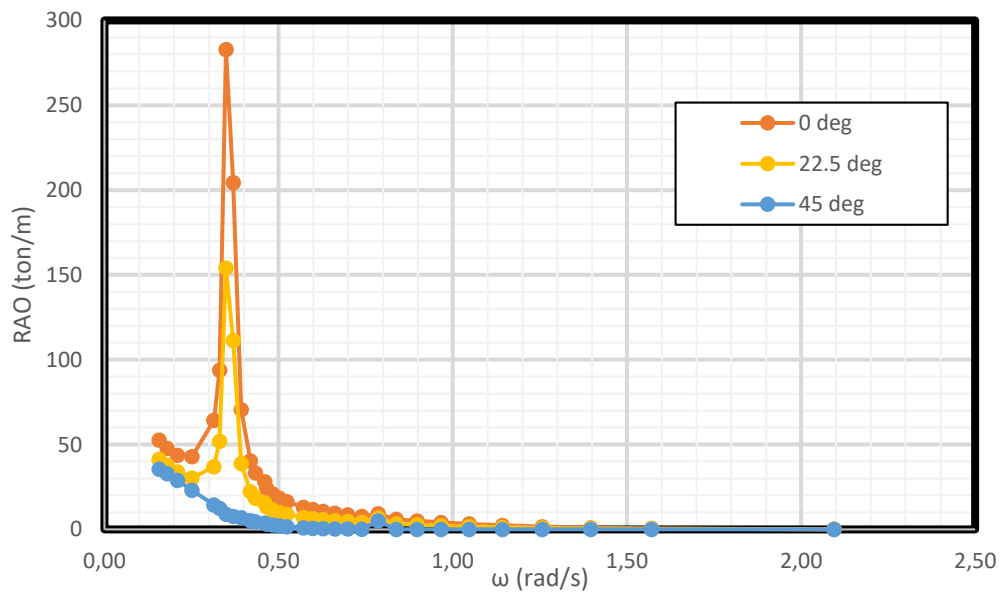
<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
0 deg	0.349	7.344
22.5 deg	0.349	6.785
45 deg	0.349	5.193

#### 4.8.3. Tegangan Tali Tambat

Pada Tugas Akhir kali ini, MOSES digunakan untuk menghitung tegangan tali dengan variasi parameterik berupa arah datang gelombang (0°, 22.5 ° dan 45°) seperti Gambar 4.80. Tegangan tali Line I mengalami penurunan signifikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. Frekuensi saat RAO terbesar di arah 0 deg dan 22.5 deg mempunyai besar yang



sama, di 0.349 rad/s, namun, berbeda saat 45 deg di 0.157 rad/s. RAO tegangan terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 282.863 ton/m.



**Gambar 4.98.** Grafik RAO Tension line I variasi *heading*

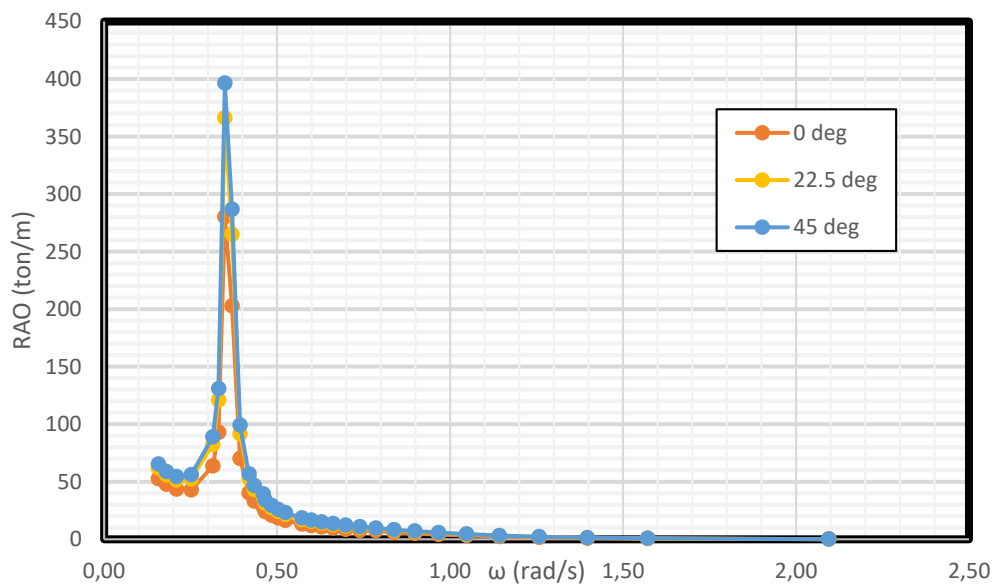
**Tabel 4.71.** Variasi *Heading* Tension Line I

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.349	282.86
22.5 deg	0.349	154.02
45 deg	0.157	35.50

Tegangan tali Line II mengalami peningkatan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. Frekuensi saat RAO terbesar pada semua *heading* terjadi di frekuensi yang sama. RAO tegangan terbesar terjadi di arah 45 deg dengan besar 396.370 ton/m.

**Tabel 4.72.** Variasi *Heading* Tension Line II

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.349	280.18
22.5 deg	0.349	366.22
45 deg	0.349	396.37



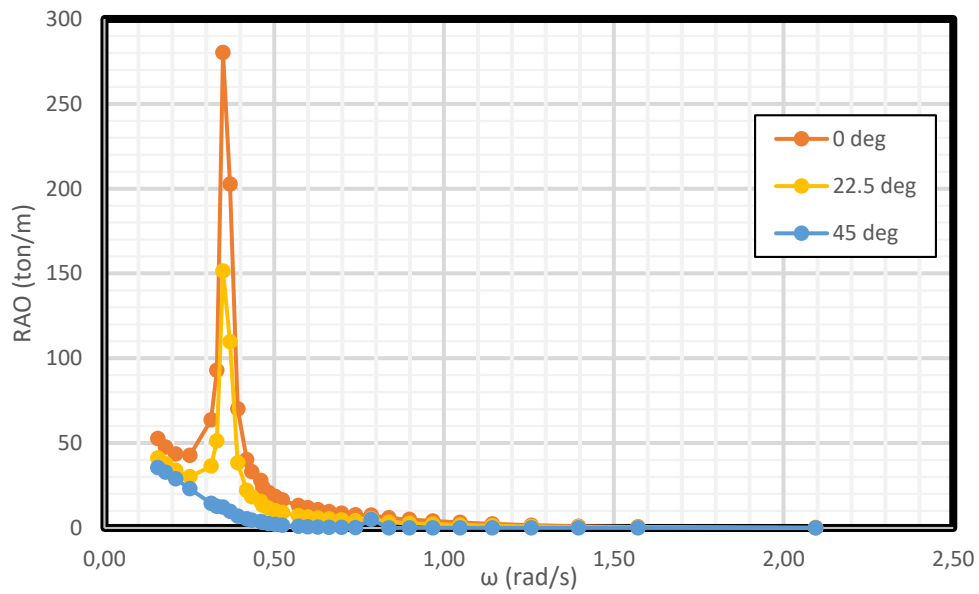
**Gambar 4.99.** Grafik RAO Tension line II variasi *heading*

Tegangan tali Line III mengalami penurunan signifikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. Frekuensi saat RAO terbesar di arah 0 deg dan 22.5 deg terjadi di frekuensi yang sama, di 0.349 rad/s, namun, berbeda saat 45 deg di 0.157 rad/s. RAO tegangan terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 280.17 ton/m.

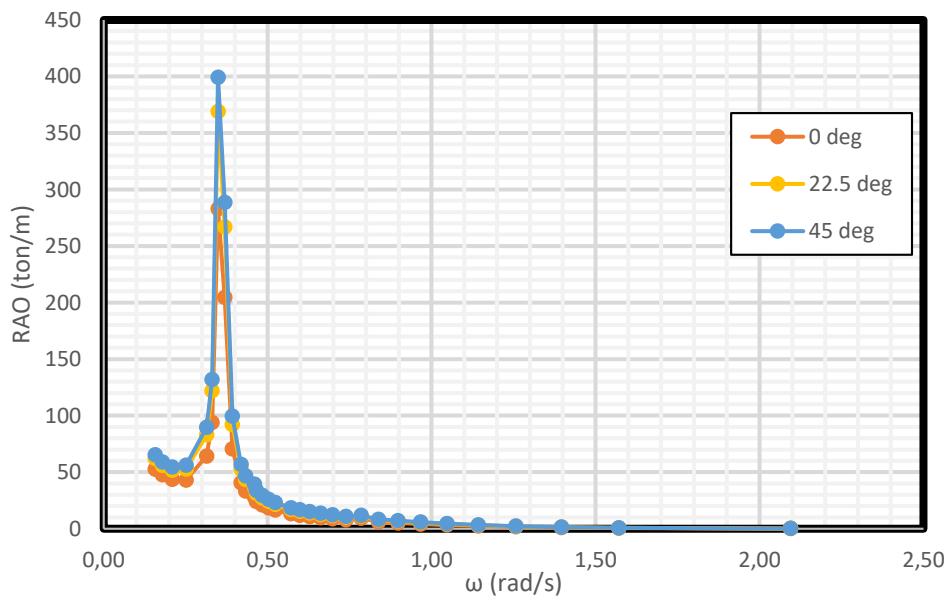
Tegangan tali Line IV mengalami peningkatan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. Frekuensi saat RAO terbesar pada semua *heading* terjadi di frekuensi yang sama. RAO tegangan terbesar terjadi di arah 45 deg dengan besar 399.160 ton/m.

**Tabel 4.73.** Variasi *Heading* Tension Line III

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.349	280.17
22.5 deg	0.349	151.46
45 deg	0.157	35.48



**Gambar 4.100.** Grafik RAO Tension line III variasi *headingg*



**Gambar 4.101.** Grafik RAO Tension line IV variasi *headingg*

**Tabel 4.74.** Variasi *Heading* Tension Line IV

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.349	282.870
22.5 deg	0.349	368.970
45 deg	0.349	399.160

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. KESIMPULAN

Dari perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan pada BAB IV maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang juga akan menjawab permasalahan yang ada pada penelitian Tugas Akhir. Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat dirangkum dari penelitian ini:

1. Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen gerak SPAR kondisi free floating menghasilkan nilai RAO yang sesuai, walaupun ada perbedaan di eksperimen *pitch* akibat adanya tali penahan drifting. Karakteristik gerak SPAR menghasilkan nilai yang bervariasi pada kondisi *free floating* dengan variasi *heading* 0°, 22.5° dan 45°. Nilai terbesar gerakan *surge* terjadi saat arah 0 dengan besar 0.946 m/m terjadi di frekuensi 0.157 rad/s. Gerakan *heave* mempunyai nilai terbesar yang sama baik pada arah 0°, 22.5° dan 45° dengan besar 4.297 m/m terjadi di frekuensi 0.251 rad/s. Nilai terbesar gerakan *pitch* terjadi saat arah 0 dengan besar 0.24 deg/m terjadi di frekuensi 0.393 rad/s.
2. Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen gerak SPAR kondisi tertambat menghasilkan nilai RAO yang sesuai, walaupun ada perbedaan di eksperimen *pitch* yang kemungkinan diakibatkan oleh damping yang tidak sesuai. Karakteristik gerak SPAR menghasilkan nilai yang bervariasi pada kondisi tertambat dengan variasi *heading* 0°, 22.5° dan 45°. Nilai terbesar gerakan *surge* terjadi saat arah 0 dengan besar 5.053 m/m. Terjadi di frekuensi 0.349 rad/s. Gerakan *heave* mempunyai nilai terbesar yang sama baik pada arah 0°, 22.5° dan 45° dengan besar 0.091 m/m terjadi di frekuensi 0.157 rad/s. Nilai terbesar gerakan *pitch* terjadi saat arah 0 dengan besar 7.344 deg/m terjadi di frekuensi 0.349 rad/s.
3. Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen tegangan tali tambat SPAR menghasilkan nilai RAO yang sesuai. Tegangan tiap tali menunjukkan karakter yang berbeda saat dikenai gelombang dengan arah datang 0°, 22.5° dan 45°. Tali Line I menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 0 dengan besar 282.86 ton/m yang terjadi pada frekuensi 0.349 rad/s. Tali Line II menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 45 dengan besar 396.37 ton/m yang

terjadi pada frekuensi 0.349 rad/s. Tali Line III menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 0 280.17 ton/m dengan besar yang terjadi pada frekuensi 0.349 rad/s. Tali Line IV menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 45 dengan besar 399.160 ton/m yang terjadi pada frekuensi 0.349 rad/s. Dengan, begitu tali yang berada sejajar dengan arah datang gelombang akan mengalami nilai tegangan yang paling besar dari tali lainnya.

## 5.2. SARAN

Saran yang dapat diberikan yang bersifat membangun untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Alat-alat laboratorium hidrodinamika sebaiknya dilengkapi dengan sensor gerak yang menggunakan image processing namun bisa menangkap 6 gerakan.
2. Analisa data eksperimen menggunakan FFT
3. Variasi *heading* juga perlu dilakukan secara eksperimental
4. Bentuk SPAR yang divariasikan menggunakan helical strakes
5. Instrumen wave probe perlu dipakai
6. Dilakukan decay test sebelum uji gelombang

## DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, AK, and AK Jain. 2003. "Dynamic Behaviour of Offshore Spar Platform Under Regular Sea Waves." *Ocean Engineering* 30 487-516.
- Ahmed, O. Montasir, A. Yenduri, and V. J. Kurian. 2016. "Evaluation of the dynamic responses of truss spar platforms for various mooring configurations with damaged lines." *Ocean Engineering* 411-421.
- Al-Solihat, Mohammed Khair, and Meyer Nahon. 2015. "Stiffness of slack and taut moorings." *Ships and Offshore Structures* (Taylor & Francis) 11 (8): 890-904.
- API. 2001. *Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units*. API Recommended Practice 2 P (API-RP2P) . USA: API.
- Bhattacharyya, Rameswar. 1978. *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons.
- Chakrabarti, Subrata K. . 1994. *Hydrodynamics of Offshore Structure* . Dorchester: Computational Mechanics Publications .
- Chen, X. B. 2011. "Offshore hydrodynamics and applications." *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol 4, No. 3* 124-142.
- Chitrapu, AS, S Saha, and VY Salpekar. 1998. "Time domain simulation of spar platform response in random waves and current." *ASME Confrence* . OMAE98-0380.
- Deep Oil Technology Inc. 1995. *Spar Model Test Joint Industry Project*. California: Deep Oil Technology Inc.
- Djarmiko, Eko Budi. 1992. *Hydro-structural studies on swath type vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- . 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.
- Duan, Fei, Zhiqiang Hu, and J. M. Niedzwecki. 2016. "Model test investigation of a spar floating wind turbine." *Marine Structures* 76-96.
- Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge .
- Irani, B. Mehernosh, Thomas Rouckout, and P. Robert Johnson. 2000. "Dynamics of a Spar Platform ." *Proceedings of the Tenth (2000) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Seattle: The International Society of Offshore and Polar Engineers. 261-268.

- Jaelani, Arif. 2008. *Kajian Eksperimental Perbandingan Pengaruh Sistem Tambat Taut dan Catenary Terhadap Gerakan SPAR Tipe Klasik Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Jain, R. K. 1980. "A simple method of calculating the equivalent." *Applied Ocean Research*, Vol. 2, No. 3 Technical Notes.
- Journee, J.M.J, and W.W. Massie. 2001. *Offshore Hydromechanics* . 1st. Delft : TU Delft.
- Keywordsuggest. 2016. *Truss SPAR Gallery*. keywordsuggest.org.
- Kristoffersen, Guro, and Tim Weaver. 2001. "Mooring Anlysis of a Truss Spar." *the 2001 Offshore Technology Conference*. Houston: Offshore Technology Conference.
- Magee, A, A Sablok, J Halkyard, L Finn, and I Datta. 2000. "Heave plate effectiveness in the performance of truss spars." *Proceedings of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. OMAE.
- Mansouri, Roozbeh, and Hassan Hadidi. 2009. "Comprehensive Study on the Linear Hydrodynamic Analysis of a Truss Spar in Random Waves." *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*.
- Mekha, BB, and JM Rosset. 1998. "Statistical response of spar platform to irregular waves." *ASME Confrence*. OMAE98-0605.
- Munson, Young, Okiishi, and Huebsch. 2009. *Fundamental of Fluid Mechanics*. USA: R. R. Donnelley/Jefferson City.
- Nestegård, Arne, Marit Ronæss, Geir Skeie, Joar Dalheim, and Torgeir Vada. 2003. "Numerical Models for SPAR Platform Dynamics." *Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers. 167-174.
- Rho, Jun B., and Hang S. Choi. 2003. "An Experimental Study For Mooring Effects on the Stability of SPAR Platform." *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers .
- Rigzone. 1999. *How Do Spars Work?*  
[http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=307](http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=307).
- Sarpkaya, Turgut. 2010. *Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Cambridge University Press.

- Seebai, T, and R Sundaravadivelu. 2009. "Effect of Taut and Catenary Mooring on Spar Platform with 5MW Wind Turbine." *Proceedings of The Eighth (2009) ISOPE Ocean Mining Symposium*. Chennai: ISOPE . 52-58.
- Sudhakar, S., and S. Nallayarasu. 2011. "Influence of Heave Plate On Hydrodynamic Response of SPAR." *30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2011*. Rotterdam: ASME.
- Wichers, J.E.W. 1986. "Progress in Computer Simulations of SPM Moored Vessels." *Proc. of Offshore Technology Conference (OTC), Paper OTC-5157*. Houston , Texas, USA,: OTC.
- Wichers, J.E.W, and R.M.H Huijsmans. 1984. "On The Low Frequency Hydrodynamic Damping Force Acting on Offshore Moored Vessels." *Proc. of Offshore Technology Conference(OTC), Paper No. OTC-4813*. Houston: USA.
- Wichers, J.E.W. . 1988. "Wave-Current Interaction Effects on Moored Tankers in High Seas." *Proc. of Offshore Technology Conference (OTC), Paper OTC-5631*,. Houston .
- Wichers, J.E.W. 1988. "'Simulation Model for Single Point Moored Tanker",." *MARIN Publication, No. 797*,. Wageningen: MARIN.
- . 1987. "The Prediction of the Behaviour of Single Point Moored Tankers." *Proc. of Workshop on Floating Structures and Offshore Operations*,. Wageningen.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN A**  
**SKRIP MOSES**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN FILE .DAT dan .CIF

- **FILE .DAT MOSES**

```
&dimen -save -dimen meters m-tons
&describe body spar
pgen A -loc 0 0 0 0 -90 0 -diftype 3ddiff -tanaka 1
plane 0 154.23 -e_circular 0 0 8 0 22.5 9
end pgen
```

- **FILE .CIF FREE FLOATING**

```
&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR (3DDiff By MOSES)
&default -depth 500 -spgwater 1.0
inmodel
&instate -condition spar 135.0264 0 0
$
&picture iso
&picture top
&picture side
&picture bow
$
&weight -compute 62.029848 61.47816 61.47816 61.47816
&equi
&status
$
Hydrodynamics
&PARA -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45\
-period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3
HYDR_SUM
end_Hydrodynamics

Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM
matrices -file
end
exforce -file
end
end_freq_response
&finish
```

- **FILE .CIF TERTAMBAT**

```
&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR (3DDiff By MOSES)
&default -depth 226.8 -spgwater 1.025
```

```

inmodel
&instate -condition spar 135.0264 0 0
$      &picture iso
$      &picture top
$      &picture side
$      &picture bow
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
medit
*A 5.6567 5.6567 122.29
*B 5.6567 -5.6567 122.29
*C -5.6567 5.6567 122.29
*D -5.6567 -5.6567 122.29
$PERLU RECHECK DENSITY MOORING SAMA YIELD STRESSNYA
~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 225 -b_tension 1199.18 -wtplen 0.065 -buoydia
0 -EMODULUS 25492905.3244

```

```

Connector IV -anc 45 126 ~wire *A
Connector I -anc -45 126 ~wire *B
Connector III -anc 135 126 ~wire *C
Connector II -anc -135 126 ~wire *D
end
&connector @ -l_tension 92.24
&picture iso
&picture top
CONN_DESIGN
TABLE I
REPORT
VLIST
PLOT 1 8 -rax 6 -NO
END
MOVE spar -line 0 200 50
REPORT
VLIST
PLOT 1 7 -NO
END
END
&DCPTIME Time To End Mooring Design
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
$&finish

```

```

Hydrodynamics
&PARAM -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45\
-period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3
HYDR_SUM
end_Hydrodynamics

```

```

Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM

```

```
matrices -file
end
exforce -file
end
fr_cforce I
REPORT
vlist
plot 1 7 -no
end
fr_cforce II
REPORT
vlist
plot 1 7 -no
end
fr_cforce III
REPORT
vlist
plot 1 7 -no
end
fr_cforce IV
REPORT
vlist
plot 1 7 -no
end
end_freq_response

&finish
```

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN B**  
**TABULASI DISTRIBUSI**



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN TABULASI DISTRIBUSI MASSA**  
**(TITIK BERAT DAN GIRASI)**

<b>Data Spar</b>
------------------

ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Data Lab		
Y=	1	g/cm <sup>3</sup>

Displasemen teori		
$\Delta = \gamma \nabla$		
$\Delta =$	13898.38934	g

Model
-------

Pre-initial design

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.489876	1	1628.489876
	Ballast 2	2	1623.089876	1	1623.089876
	Ballast 3	2.5	2094.089876	1	2094.089876
	Ballast 4	1	663.5898755	1	663.5898755
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.689876	1	2096.689876
	Ballast 2	0.8	465.9898755	1	465.9898755
	Ballast 3	0.5	179.4898755	1	179.4898755
Topside		0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.0898755	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1	4087.529853
	Penyambung	-		1	0
	Mur	-		2	0
Total					13838.0131

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ballast 1	2	6.8	1628.489876	11073.73115
Ballast 2	2	4.8	1623.089876	7790.831403
Ballast 4	1	3.3	2094.089876	6910.496589
Ballast 3	2.5	1.6	663.5898755	1028.564307
Cap	0.3	0.2	47.46423964	7.119635947
Total			6056.723742	26810.74309

### Pengecekan

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -0.4\% \quad \text{memenuhi} \end{aligned}$$

### 2. Blok B

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
<i>Ballast 7</i>	0.5	112.1	179.4898755	20111.84055
<i>Ballast 6</i>	0.8	111.4	465.9898755	51911.27213
<i>Ballast 5</i>	2.5	109.8	2096.689876	230111.7138
Total			2742.169627	302134.8265

$$\text{VCG Blok B} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 110.1809398 \text{ cm dari keel}$$

### 3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ulir (130 cm)	-	65.3	352.0898755	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
<i>Topside</i>	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5039.119729	349260.2858

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 69.3097812 \text{ cm dari keel}$$

### 4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.723742	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.169627	302134.8265

Tambahan	-	69.3	5039.119729	349260.2858
<b>Total</b>			<b>13838.0131</b>	<b>678205.8554</b>

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.01034929 \text{ cm dari keel}$$

#### Pengecekan

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -1.2\% \quad \text{memenuhi} \end{aligned}$$

### Perhitungan Radius girasi model

1. Blok A								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 1	2	6.5	0	0	12.5	1628.4899	16446.0514	16446.0514
Ballast 2	2	4.5	0	0	12.5	1623.0899	16391.51702	16391.51702
Ballast 3	1	3.0	0	0	12.5	2094.0899	20624.60393	20624.60393
Ballast 4	2.5	1.3	0	0	12.5	663.58988	6825.989605	6825.989605
Cap	0.3	0.2	0	0	12.6	47.46424	471.3198997	471.3198997
2. Blok B								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 7	0.5	112.05	0	0	12.5	179.48988	1756.570188	1756.570188
Ballast 6	0.8	111.4	0	0	12.5	465.98988	4556.895577	4556.895577
Ballast 5	2.5	109.75	0	0	12.5	2096.6899	20748.49356	20748.49356
3. Tambahan								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	LCG (cm)	TCG (cm)	Ukuran (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ulir (130 cm)	0.8	65.3	0	0	1	352.08988	495873.9916	495873.9916
Pipa	123.4	61.7	0	0	14	4087.5299	5287070.0	5287069.989
Topside	0.3	123.55	0	0	40	599.5	79937.82958	79937.82958

4. Total														
Bagian		LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)	$y^2+z^2$	$x^2+z^2$	$w*(y^2+z^2)$	$w*(x^2+z^2)$	lx (g.cm)	ly (g.cm)
Blok A	Ballast 1	0.00	0.00	6.50	-42.51	1628.49	16446.05	16446.05	1807.13	1807.13	2942892.58	2942892.58	2959338.63	2959338.63
	Ballast 2	0.00	0.00	4.50	-44.51	1623.09	16391.52	16391.52	1981.17	1981.17	3215618.91	3215618.91	3232010.42	3232010.42
	Ballast 3	0.00	0.00	3.00	-46.01	2094.09	20624.60	20624.60	2116.95	2116.95	4433088.26	4433088.26	4453712.86	4453712.86
	Ballast 4	0.00	0.00	1.25	-47.76	663.59	6825.99	6825.99	2281.05	2281.05	1513682.33	1513682.33	1520508.32	1520508.32
	Cap	0.00	0.00	0.15	-48.86	47.46	471.32	471.32	2387.33	2387.33	113312.98	113312.98	113784.30	113784.30
Blok B	Ballast 1	0.00	0.00	112.05	63.04	179.49	1756.57	1756.57	3974.00	3974.00	713292.33	713292.33	715048.90	715048.90
	Ballast 2	0.00	0.00	111.40	62.39	465.99	4556.90	4556.90	3892.47	3892.47	1813850.92	1813850.92	1818407.81	1818407.81
	Ballast 3	0.00	0.00	109.75	60.74	2096.69	20748.49	20748.49	3689.31	3689.31	7735328.79	7735328.79	7756077.29	7756077.29
Tambahan	Ulir (130 cm)	0.00	0.00	65.30	16.29	352.09	495873.99	495873.99	265.35	265.35	93428.01	93428.01	589302.00	589302.00
	Pipa	0.00	0.00	61.70	12.69	4087.53	5287069.99	5287069.99	161.03	161.03	658203.63	658203.63	5945273.62	5945273.62
	Topside	0.00	0.00	123.55	74.54	599.50	79937.83	79937.83	5556.16	5556.16	3330917.64	3330917.64	3410855.47	3410855.47
Total													32514319.61	32514319.6

#### 5. Jari Jari Girasi

Rxx= 48.47306334 cm

Ryy= 48.47306334 cm

#### 6. Check

Err Rxx= -1.43%

Err Ryy= -1.43%

memenuhi

memenuhi

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN C**

**PENGUKURAN PERIODE GERAK**

**PENDULUM SPAR**



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM MODEL SPAR

No uji coba	Model tanpa beban tambahan		Model dengan beban tambahan	
	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)
1	34.918	3.492	35.131	3.513
2	35.063	3.506	35.226	3.523
3	34.958	3.496	35.159	3.516
4	34.727	3.473	35.231	3.523
5	34.973	3.497	35.058	3.506
6	35.037	3.504	35.236	3.524
7	34.882	3.488	35.026	3.503
8	34.800	3.480	35.148	3.515
9	35.160	3.516	35.330	3.533
10	35.220	3.522	35.530	3.553
11	34.746	3.475	35.460	3.546
12	34.858	3.486	35.040	3.504
13	35.150	3.515	36.110	3.611
14	34.896	3.490	35.117	3.512
15	35.510	3.551	35.200	3.520
16	35.000	3.500	36.030	3.603
17	34.880	3.488	35.120	3.512
18	35.060	3.506	36.020	3.602
19	35.180	3.518	35.970	3.597
20	34.850	3.485	35.132	3.513
21	34.910	3.491	35.760	3.576
22	35.240	3.524	35.920	3.592
23	35.310	3.531	35.570	3.557
24	35.030	3.503	35.183	3.518
25	35.140	3.514	35.390	3.539
26	34.900	3.490	35.790	3.579
27	35.271	3.527	35.370	3.537
28	34.970	3.497	36.080	3.608
29	35.130	3.513	35.105	3.511
30	35.038	3.504	35.191	3.519
31	35.220	3.522	35.084	3.508
32	34.910	3.491	35.135	3.514
33	34.852	3.485	35.650	3.565
34	34.678	3.468	36.120	3.612
35	34.960	3.496	34.960	3.496
36	35.110	3.511	35.450	3.545
37	35.070	3.507	36.050	3.605
38	35.210	3.521	35.820	3.582
39	35.102	3.510	35.660	3.566
40	34.940	3.494	35.790	3.579
41	34.810	3.481	35.150	3.515
42	35.012	3.501	35.380	3.538
43	35.111	3.511	35.250	3.525
44	34.938	3.494	35.143	3.514
45	34.900	3.490	35.117	3.512
46	34.985	3.499	35.252	3.525
47	35.109	3.511	35.252	3.525
48	35.131	3.513	35.049	3.505
49	34.995	3.500	35.038	3.504
50	35.158	3.516	35.025	3.503

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

LAMPIRAN D

STUDI ANALITIS *FREE FLOATING*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ANALITIS SURGE FREE FLOATING

<b>HULL CHARACTERISTICS</b>		
	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

<b>Density</b>	1025.00	Kg/m3
<b>Massa</b>	27834342.56	kg
<b>Added Mass</b>	27834342.56	Kg/m
<b>Massa total</b>	55668685.11	kg
<b>WPA</b>	201.11	M2
<b>Surge Stiffness</b>	0	0
<b>Natural Freq</b>	0	0

<b>T</b>	<b><math>\omega</math> (rad/s)</b>	<b>k</b>	<b>Fa</b>	<b>RAO</b>
40	0.16	0.002515	1164633	0.848
35	0.18	0.003285	1448995	0.808
30	0.21	0.004471	1833155	0.751
25.00	0.25	0.006439	2349047	0.668
20.00	0.31	0.010061	3004819	0.547
19.00	0.33	0.011148	3146730	0.517
18.00	0.35	0.012421	3288510	0.485
17.00	0.37	0.013925	3427465	0.451
16.00	0.39	0.01572	3560267	0.415
15.00	0.42	0.017886	3683043	0.377
14.50	0.43	0.019141	3739372	0.358
14.00	0.45	0.020532	3791636	0.338
13.50	0.47	0.022081	3839355	0.318
13.00	0.48	0.023812	3882110	0.299
12.50	0.50	0.025756	3919578	0.279
12.00	0.52	0.027947	3951561	0.259
11.00	0.57	0.033259	3999122	0.220
10.50	0.60	0.036502	4015201	0.201
10.00	0.63	0.040243	4026808	0.183
9.50	0.66	0.044591	4034649	0.166
9.00	0.70	0.049683	4039531	0.149
8.50	0.74	0.0557	4042276	0.133
8.00	0.79	0.06288	4043636	0.118
7.50	0.84	0.071543	4044209	0.104

<b>T</b>	<b><math>\omega</math> (rad/s)</b>	<b>k</b>	<b>Fa</b>	<b>RAO</b>
7.00	0.90	0.082129	4044405	0.090
6.50	0.97	0.09525	4044456	0.078
6.00	1.05	0.111786	4044466	0.066
5.50	1.14	0.133035	4044467	0.056
5.00	1.26	0.160972	4044467	0.046
4.50	1.40	0.198731	4044467	0.037
4.00	1.57	0.251519	4044467	0.029
3.00	2.09	0.447145	4044467	0.017

### ANALITIS HEAVE FREE FLOATING

#### HULL CHARACTERISTICS

	Full Scale	Model
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

<b>Density</b>	1025.00	Kg/m3
<b>Massa</b>	27834342.56	kg
<b>Added Mass</b>	699995.77	kg
<b>Massa total</b>	28534338.32	kg
<b>WPA</b>	201.11	M2
<b>Heave Stiffness</b>	2022233.434	N/m
<b>Natural Freq</b>	0.26621452	Rad/s

<b>T</b>	<b><math>\omega</math> (rad/s)</b>	<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Fa</b>	<b>RAO</b>
40	0.16	0.00251519	0.71204	2004961.7	1427619	1.083
35	0.18	0.003285146	0.64173	1999674.5	1283259	1.164
30	0.21	0.004471448	0.54675	1991528.2	1088868	1.413
25.00	0.25	0.006438886	0.41919	1978017.9	829174.8	3.772
20.00	0.31	0.010060759	0.25705	1953146.6	502064.7	0.632
19.00	0.33	0.011147655	0.22197	1945682.9	431876.9	0.393
18.00	0.35	0.01242069	0.18691	1936941.1	362036.2	0.249
17.00	0.37	0.013924926	0.15255	1926611.5	293913.5	0.157
16.00	0.39	0.015719936	0.11972	1914285.3	229176.7	0.096
15.00	0.42	0.017885793	0.08936	1899412.4	169736.2	0.057
14.50	0.43	0.019140564	0.07544	1890796	142632.6	0.043
14.00	0.45	0.020532161	0.06251	1881239.9	117601.6	0.032
13.50	0.47	0.022081226	0.05071	1870602.6	94866.19	0.023

T	$\omega$ (rad/s)	k	A	B	Fa	RAO
13.00	0.48	0.023812447	0.04014	1858714.3	74614.24	0.016
12.50	0.50	0.025755543	0.03088	1845371.2	56983.26	0.011
12.00	0.52	0.027946552	0.02297	1830325.6	42044.43	0.007
11.00	0.57	0.033258707	0.01121	1793847.3	20111.96	0.003
10.50	0.60	0.036501619	0.00724	1771578.3	12819.2	0.002
10.00	0.63	0.040243035	0.00437	1745886.2	7622.812	0.001
9.50	0.66	0.044590621	0.00243	1716031.5	4165.593	0.000
9.00	0.70	0.04968276	0.00122	1681064	2051.76	0.000
8.50	0.74	0.055699703	0.00054	1639745.9	888.133	0.000
8.00	0.79	0.062879743	0.00021	1590440.9	326.7177	0.000
7.50	0.84	0.071543174	0.00006	1530949.4	97.62967	0.000
7.00	0.90	0.082128643	0.00002	1458259.5	22.26952	0.000
6.50	0.97	0.095249788	0.00000	1368157.1	3.552812	0.000
6.00	1.05	0.111786209	0.00000	1254602.2	0.349322	0.000
5.50	1.14	0.133034827	0.00000	1108688.8	0.017518	0.000
5.00	1.26	0.160972141	0.00000	916844.43	0.000333	0.000
4.50	1.40	0.198731038	0.00000	657555.65	1.46E-06	0.000
4.00	1.57	0.25151897	0.00000	295063.11	5.25E-10	0.000
3.00	2.09	0.447144836	0.00000	1048291.6	6.3E-21	0.000

### ANALITIS PITCH FREE FLOATING

HULL CHARACTERISTICS		
	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

Density	1025.00	Kg/m <sup>3</sup>
massa	27828127.19	kg
Momen inersia massa	105178192100.4950	Kg m <sup>2</sup>
Momen inersia massa tambah	63106915260	Kg m <sup>2</sup>
momen inelrsia total	168285107360.79	Kg m <sup>2</sup>
Pitch Stiffness	1529619959	N m
Natural Freq	0.095338635	Rad/s



T	$\omega$ (rad/s)	k	Fa	Ma	RAO analitis	RAO analitis( $\Theta$ /m)
40	0.16	0.00251519	-4043456	10823807	0.0041	0.2365
35	0.18	0.003285146	-4043456	15148371	0.0039	0.2229
30	0.21	0.004471448	-4043456	22422849	0.0038	0.2195
25.00	0.25	0.006438886	-4043456	35565381	0.0039	0.2239
20.00	0.31	0.010060759	-4043456	61036444	0.0040	0.2319
19.00	0.33	0.011147655	-4043456	68621963	0.0041	0.2330
18.00	0.35	0.01242069	-4043456	77341900	0.0041	0.2335
17.00	0.37	0.013924926	-4043456	87342108	0.0041	0.2332
16.00	0.39	0.015719936	-4043456	98759629	0.0040	0.2317
15.00	0.42	0.017885793	-4043456	1.12E+08	0.0040	0.2286
14.50	0.43	0.019140564	-4043456	1.19E+08	0.0039	0.2263
14.00	0.45	0.020532161	-4043456	1.26E+08	0.0039	0.2234
13.50	0.47	0.022081226	-4043456	1.34E+08	0.0038	0.2199
13.00	0.48	0.023812447	-4043456	1.42E+08	0.0038	0.2157
12.50	0.50	0.025755543	-4043456	1.51E+08	0.0037	0.2107
12.00	0.52	0.027946552	-4043456	1.6E+08	0.0036	0.2049
11.00	0.57	0.033258707	-4043456	1.78E+08	0.0033	0.1908
10.50	0.60	0.036501619	-4043456	1.87E+08	0.0032	0.1824
10.00	0.63	0.040243035	-4043456	1.96E+08	0.0030	0.1732
9.50	0.66	0.044590621	-4043456	2.05E+08	0.0028	0.1632
9.00	0.70	0.04968276	-4043456	2.14E+08	0.0027	0.1525
8.50	0.74	0.055699703	-4043456	2.23E+08	0.0025	0.1411
8.00	0.79	0.062879743	-4043456	2.31E+08	0.0023	0.1294
7.50	0.84	0.071543174	-4043456	2.39E+08	0.0020	0.1173
7.00	0.90	0.082128643	-4043456	2.46E+08	0.0018	0.1051
6.50	0.97	0.095249788	-4043456	2.53E+08	0.0016	0.0930
6.00	1.05	0.111786209	-4043456	2.59E+08	0.0014	0.0811
5.50	1.14	0.133034827	-4043456	2.65E+08	0.0012	0.0696
5.00	1.26	0.160972141	-4043456	2.7E+08	0.0010	0.0586
4.50	1.40	0.198731038	-4043456	2.75E+08	0.0008	0.0482
4.00	1.57	0.25151897	-4043456	2.79E+08	0.0007	0.0387
3.00	2.09	0.447144836	-4043456	2.86E+08	0.0004	0.0223

**LAMPIRAN E**  
**STUDI ANALITIS TERTAMBAT**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ANALITIS SURGE TERTAMBAT

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \varphi_i$$

### Data Mooring

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo (ki)	5548996.458	N/m

### Sudut Sebar-Line

$\beta_1$	45.000	deg
$\beta_2$	135.000	deg
$\beta_3$	225.000	deg
$\beta_4$	315.000	deg

	Full Scale	
Line 1	2774498	N/m
Line 2	2774498	N/m
Line 3	2774498	N/m
Line 4	2774498	N/m
K11	11097993	N/m

### Perhitungan Surge Tertambat

<b>m</b>	27834342.56	kg	(massa)
<b>ma</b>	27834342.56	kg	(massa tambah)
<b>kh</b>	0.00	N/m	(kekakuan hidrostatik)
<b>km</b>	11097992.92	N/m	(kekakuan mooring)
<b>K</b>	11097992.92	N/m	(kekakuan total)
<b>b</b>	0.00	Ns/m	(damping)

T	$\omega$	Fa	RAO (m/m)
(s)	(rad/s)	(N)	Analitis
40.000	0.157	1164632.646	0.120
35.000	0.180	1448994.995	0.156
30.000	0.209	1833154.510	0.212
25.000	0.251	2349047.384	0.310

<b>T</b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Fa</b>	<b>RAO (m/m)</b>
<b>(s)</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(N)</b>	<b>Analitis</b>
20.000	0.314	3004819.384	0.536
19.000	0.331	3146729.761	0.628
18.000	0.349	3288510.259	0.762
17.000	0.370	3427464.764	0.981
16.000	0.393	3560266.549	1.417
15.000	0.419	3683043.252	2.768
14.500	0.433	3739371.745	5.796
14.000	0.460	3791635.873	5.564
13.500	0.465	3839354.800	3.996
13.000	0.483	3882110.123	2.037
12.500	0.503	3919577.682	1.321
12.000	0.524	3951561.383	0.949
11.000	0.571	3999121.792	0.566
10.500	0.598	4015200.974	0.454
10.000	0.628	4026808.092	0.370
9.500	0.661	4034649.097	0.304
9.000	0.698	4039530.543	0.252
8.500	0.739	4042276.269	0.209
8.000	0.785	4043636.029	0.174
7.500	0.838	4044208.949	0.145
7.000	0.898	4044405.103	0.120
6.500	0.967	4044456.364	0.099
6.000	1.047	4044465.741	0.081
5.500	1.142	4044466.803	0.066
5.000	1.257	4044466.866	0.053
4.500	1.396	4044466.867	0.042
4.000	1.571	4044466.867	0.032
3.000	2.094	4044466.867	0.017

### ANALISIS HEAVE TERTAMBAT

#### Data Mooring

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo	5548996.458	N/m
T	904874.400	N
L	211.173	m

#### Sudut Tanah-Line

$\alpha_1$	60.000	deg
$\alpha_2$	60.000	deg

$\alpha_3$	60.000	deg
$\alpha_4$	60.000	deg

**Sudut Sebar-Line**

$\beta_1$	45.000	deg
$\beta_2$	135.000	deg
$\beta_3$	225.000	deg
$\beta_4$	315.000	deg

	kp11 (N/m)	kp22 (N/m)	kp12 (N/m)
LineA	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineB	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineC	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineD	1390451.634	4162814.85	2400936.973

	k33	
LineA	4162815	N/m
LineB	4162815	N/m
LineC	4162815	N/m
LineD	4162815	N/m
K33 (TOTAL)	16651259	N/m

**Perhitungan Heave Tertambat**

<b>m</b>	27834342.56	kg	(massa)
<b>ma</b>	27834342.56	kg	(massa tambah)
<b>kh</b>	2022233.434	N/m	(kekakuan hidrostatik)
<b>km</b>	16651259.40	N/m	(kekakuan mooring)
<b>K</b>	18673492.83	N/m	(kekakuan total)
<b>b</b>	0.00	Ns/m	(damping)

T	$\omega$	Fa	RAO (m/m)
(s)	(rad/s)	(N)	Analitis
40.000	0.157	1427619	0.079
35.000	0.180	1283259	0.072
30.000	0.209	1088868	0.063
25.000	0.251	829174.8	0.049
20.000	0.314	502064.7	0.032
19.000	0.331	431876.9	0.028
18.000	0.349	362036.2	0.024
17.000	0.370	293913.5	0.020
16.000	0.393	229176.7	0.016

T	$\omega$	Fa	RAO (m/m)
15.000	0.419	169736.2	0.012
14.500	0.433	142632.6	0.011
14.000	0.449	117601.6	0.009
13.500	0.465	94866.19	0.008
13.000	0.483	74614.24	0.006
12.500	0.503	56983.26	0.005
12.000	0.524	42044.43	0.004
11.000	0.571	20111.96	0.002
10.500	0.598	12819.2	0.002
10.000	0.628	7622.812	0.001
9.500	0.661	4165.593	0.001
9.000	0.698	2051.76	0.000
8.500	0.739	888.133	0.000
8.000	0.785	326.7177	0.000
7.500	0.838	97.62967	0.000
7.000	0.898	22.26952	0.000
6.500	0.967	3.552812	0.000
6.000	1.047	0.349322	0.000
5.500	1.142	0.017518	0.000
5.000	1.257	0.000333	0.000
4.500	1.396	1.46E-06	0.000
4.000	1.571	5.25E-10	0.000
3.000	2.094	6.3E-21	0.000

### ANALITIS PITCH TERTAMBAT

Rho	55
w	539.55
Y	200
Tb	904874.4
L	211.75
Theta	60
	1.047197551
To	452437.2
I	1452.403332
xb	1104.329058
yb	838.5454545
ya	1038.545455
L'	1679.378397
L	226.9750657
xa	1211.576404

X	107.2473455
Ta	1012784.4
A	450.8857644
B	5.30912E-05
M	0.000183952
R	44.67260752

#### K55

Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
K11 Total	23060196272.604	N

#### Perhitungan Pitch Tertambat

I	105201683462.20	kg m <sup>2</sup>
Ia	63121010077.32	kg m <sup>2</sup>
kh	1529619959.06	N/m
km	23060196272.60	N/m
K	24589816231.67	N/m
b	0.00	N s/m

T	$\omega$	Ma	RAO (deg/m)
(s)	(rad/s)	(N m)	Analitis
40.000	0.157	10828130.788	0.030
35.000	0.180	15154062.849	0.045
30.000	0.209	22430662.855	0.075
25.000	0.251	35576710.654	0.146
20.000	0.314	61054039.927	0.439
19.000	0.331	68641354.617	0.636
18.000	0.349	77363333.066	1.086
17.000	0.370	87365863.851	3.136
16.000	0.393	98786020.651	4.138
15.000	0.419	111731150.755	1.295
14.500	0.433	118793419.567	0.970
14.000	0.449	126247068.051	0.777
13.500	0.465	134081042.158	0.647
13.000	0.483	142274490.027	0.553
12.500	0.503	150795141.063	0.482
12.000	0.524	159597951.285	0.424
11.000	0.571	177802031.225	0.336
10.500	0.598	187046868.816	0.300



<b>T</b>	<b><math>\omega</math></b>	<b>Ma</b>	<b>RAO (deg/m)</b>
<b>(s)</b>	<b>(rad/s)</b>	<b>(N m)</b>	<b>Analitis</b>
10.000	0.628	196265271.147	0.269
9.500	0.661	205359118.525	0.240
9.000	0.698	214231850.468	0.214
8.500	0.739	222795346.322	0.189
8.000	0.785	230976220.754	0.167
7.500	0.838	238719905.110	0.146
7.000	0.898	245991210.017	0.127
6.500	0.967	252771208.633	0.109
6.000	1.047	259051841.772	0.093
5.500	1.142	264830576.046	0.078
5.000	1.257	270106876.262	0.064
4.500	1.396	274880675.525	0.052
4.000	1.571	279151969.692	0.041
3.000	2.094	286187042.439	0.023

**LAMPIRAN F**  
**STUDI NUMERIS *FREE FLOATING***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# NUMERIS FREE FLOATING

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of  
Institut Teknologi SepuluhSura

Copying of this program or use by anyone other  
than an employee of the above firm without  
written consent of Bentley Systems is strictly  
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons  
>&device -oecho no  
>&title SPAR (3DDiff By MOSES)  
>&default -depth 500 -spgwater 1.0  
>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.22

>&instate -condition spar 135.0264 0 0  
>&picture iso  
>&picture top  
>&picture side  
>&picture bow  
>&weight -compute 62.029848 61.47816 61.47816  
>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified  
Location and Net Force at Body Origin

	Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR	Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
	N Force	0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified  
Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 61.48

GMT = 5.60 GML = 5.60

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full

Name	Weight	---X---	---Y---	---Z---	-----
----- Part SPAR -----					
LOAD_GRO	27148.66	0.00	0.00	62.03	

=====

Total	27148.66	0.00	0.00	62.03
Buoyancy	27148.66	-0.00	0.00	67.51

>Hydrodynamics

>&PARA -M\_DIST 3.5

>&picture iso -type mesh -detail

>G\_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \

15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \

4.5 4 3

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1

=====

Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640

Time to Generate 640 Panels For S : CP= 0.05  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1 : CP= 0.69  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2 : CP= 0.53  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3 : CP= 0.49  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4 : CP= 0.51  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5 : CP= 0.77  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6 : CP= 0.70  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7 : CP= 0.61  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8 : CP= 0.43  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9 : CP= 0.54  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10 : CP= 0.40  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11 : CP= 0.42  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12 : CP= 0.48  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13 : CP= 0.38  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14 : CP= 0.38  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15 : CP= 0.50  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16 : CP= 0.49  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17 : CP= 0.39  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18 : CP= 0.37  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19 : CP= 0.38  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20 : CP= 0.39  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21 : CP= 0.37  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22 : CP= 0.36  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 23 : CP= 0.39  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 24 : CP= 0.39  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 25 : CP= 0.37  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 26 : CP= 0.39  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 27 : CP= 0.36  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 28 : CP= 0.40  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 29 : CP= 0.37  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 30 : CP= 0.44  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 31 : CP= 0.59  
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 32 : CP= 1.35

Setting Drift Name for SPAR to PKT1

\*\*\*\*\*

\*\*\* WARNING: Negative On Diagonal Of Damping

\*\*\*\*\*

Time To Set Up Convolution For PKT1 : CP= 0.09  
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP= 0.01

>HYDR\_SUM

>end\_Hydrodynamics

>

>Freq\_response

>rao -speed 0 -iter 500

Time To Compute RAOs : CP= 0.04

>fp\_std 1.704959E-5 1.724023E-7 62.02985

>EQU\_SUM

>matrices -file

>end

>exforce -file

>end

>end\_freq\_response

>

>&finish

MOSES Finished with 1 Warnings

\*\*\*\*\*

CP Time 16.80

\*\*\*\*\*

Total Units 16.80

\*\*\*\*\*



0.4488	14.00	0.328	90	0.000	0	0.029	-178	0.000	0	0.236	90	0.000	0
0.4654	13.50	0.308	90	0.000	0	0.021	-178	0.000	0	0.233	90	0.000	0
0.4833	13.00	0.288	90	0.000	0	0.015	-177	0.000	0	0.230	90	0.000	0
0.5027	12.50	0.269	90	0.000	0	0.010	-177	0.000	0	0.226	90	0.000	0
0.5236	12.00	0.249	90	0.000	0	0.006	-177	0.000	0	0.220	90	0.000	0
0.5712	11.00	0.211	89	0.000	0	0.002	-176	0.000	0	0.207	89	0.000	0
0.5984	10.50	0.193	89	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.199	89	0.000	0
0.6283	10.00	0.175	88	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.190	88	0.000	0
0.6614	9.50	0.158	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.179	88	0.000	0
0.6981	9.00	0.141	87	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.168	87	0.000	0
0.7392	8.50	0.125	86	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.155	86	0.000	0
0.7854	8.00	0.110	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.141	85	0.000	0
0.8378	7.50	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.126	83	0.000	0
0.8976	7.00	0.079	81	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.109	81	0.000	0
0.9666	6.50	0.064	79	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.091	79	0.000	0
1.0472	6.00	0.050	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.072	76	0.000	0
1.1424	5.50	0.036	75	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.054	75	0.000	0
1.2566	5.00	0.024	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.036	77	0.000	0
1.3963	4.50	0.015	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.023	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.008	99	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.013	99	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	157	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.001	156	0.000	0

Page 10 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

*		*** MOSES ***	*
*		-----	July 17, 2017
*	SPAR (3DDiff By MOSES)		*
* Draft	= 135.0 Meters	Trim Angle = 0.00 Deg.	GMT = 5.6 Meters *
* Roll Gy. Radius	= 61.5 Meters	Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters	Yaw Gy. Radius = 61.5 Meters *
* Heading	= 22.50 Deg.	Forward Speed = 0.00 Knots	Linearization Based on 1/ 20 *

\*\*\*\*\*

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

ENCOUNTER		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.874	90	0.362	90	1.109	0	0.088	-89	0.213	90	0.000	0
0.1795	35.00	0.786	90	0.326	90	1.193	0	0.080	-89	0.193	90	0.000	0
0.2094	30.00	0.700	90	0.290	90	1.454	0	0.078	-89	0.189	90	0.000	0
0.2513	25.00	0.610	90	0.253	90	4.297	0	0.082	-89	0.198	90	0.000	0
0.3142	20.00	0.495	90	0.205	90	0.583	-179	0.089	-89	0.214	90	0.000	0
0.3307	19.00	0.467	90	0.194	90	0.365	-179	0.090	-89	0.217	90	0.000	0
0.3491	18.00	0.438	90	0.181	90	0.232	-178	0.091	-89	0.219	90	0.000	0
0.3696	17.00	0.406	90	0.168	90	0.146	-178	0.092	-89	0.221	90	0.000	0
0.3927	16.00	0.373	90	0.154	90	0.089	-178	0.092	-89	0.222	90	0.000	0
0.4189	15.00	0.338	90	0.140	90	0.052	-178	0.091	-89	0.221	90	0.000	0
0.4333	14.50	0.321	90	0.133	90	0.039	-178	0.091	-89	0.220	90	0.000	0
0.4488	14.00	0.303	90	0.125	90	0.029	-178	0.090	-89	0.218	90	0.000	0
0.4654	13.50	0.285	90	0.118	90	0.021	-178	0.089	-89	0.215	90	0.000	0
0.4833	13.00	0.266	90	0.110	90	0.015	-177	0.088	-89	0.212	90	0.000	0
0.5027	12.50	0.248	90	0.103	90	0.010	-177	0.086	-89	0.208	90	0.000	0
0.5236	12.00	0.230	90	0.095	90	0.006	-177	0.084	-89	0.204	90	0.000	0
0.5712	11.00	0.195	89	0.081	89	0.002	-176	0.079	-90	0.191	89	0.000	0
0.5984	10.50	0.178	89	0.074	89	0.001	-175	0.076	-90	0.184	89	0.000	0
0.6283	10.00	0.162	88	0.067	88	0.001	-175	0.073	-91	0.175	88	0.000	0



0.6614	9.50	0.146	88	0.060	88	0.000	0	0.069	-91	0.166	88	0.000	0
0.6981	9.00	0.130	87	0.054	87	0.000	0	0.064	-92	0.155	87	0.000	0
0.7392	8.50	0.116	86	0.048	86	0.000	0	0.059	-93	0.143	86	0.000	0
0.7854	8.00	0.101	85	0.042	85	0.000	0	0.054	-94	0.130	85	0.000	0
0.8378	7.50	0.087	83	0.036	83	0.000	0	0.048	-96	0.116	83	0.000	0
0.8976	7.00	0.073	81	0.030	81	0.000	0	0.042	-98	0.101	81	0.000	0
0.9666	6.50	0.059	79	0.025	79	0.000	0	0.035	-100	0.085	79	0.000	0
1.0472	6.00	0.046	77	0.019	77	0.000	0	0.028	-103	0.067	76	0.000	0
1.1424	5.50	0.033	75	0.014	75	0.000	0	0.021	-104	0.050	75	0.000	0
1.2566	5.00	0.022	77	0.009	77	0.000	0	0.014	-102	0.034	77	0.000	0
1.3963	4.50	0.013	84	0.006	84	0.000	0	0.009	-95	0.021	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.007	99	0.003	99	0.000	0	0.005	-80	0.012	99	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	157	0.000	0	0.000	0	0.001	-23	0.001	156	0.000	0

Page 11 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

\* \*\*\* MOSES \*\*\* \*

\* ----- July 17, 2017 \*

\* SPAR (3DDiff By MOSES) \*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 5.6 Meters \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius = 61.5 Meters \*

\* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 \*

\*\*\*\*\*

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R Surge / Sway / Heave / Roll / Pitch / Yaw /

----- Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl.

Frequency -(Rad/Sec)-	Period -(Sec)-	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
		Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.669	90	0.669	90	1.109	0	0.163	-89	0.163	90	0.000	0
0.1795	35.00	0.602	90	0.602	90	1.193	0	0.148	-89	0.148	90	0.000	0
0.2094	30.00	0.536	90	0.536	90	1.454	0	0.145	-89	0.145	90	0.000	0
0.2513	25.00	0.467	90	0.467	90	4.297	0	0.151	-89	0.151	90	0.000	0
0.3142	20.00	0.379	90	0.379	90	0.583	-179	0.164	-89	0.164	90	0.000	0
0.3307	19.00	0.358	90	0.358	90	0.365	-179	0.166	-89	0.166	90	0.000	0
0.3491	18.00	0.335	90	0.335	90	0.232	-178	0.168	-89	0.168	90	0.000	0
0.3696	17.00	0.311	90	0.311	90	0.146	-178	0.169	-89	0.169	90	0.000	0
0.3927	16.00	0.285	90	0.285	90	0.089	-178	0.170	-89	0.170	90	0.000	0
0.4189	15.00	0.259	90	0.259	90	0.052	-178	0.169	-89	0.169	90	0.000	0
0.4333	14.50	0.245	90	0.245	90	0.039	-178	0.168	-89	0.168	90	0.000	0
0.4488	14.00	0.232	90	0.232	90	0.029	-178	0.167	-89	0.167	90	0.000	0
0.4654	13.50	0.218	90	0.218	90	0.021	-178	0.165	-89	0.165	90	0.000	0
0.4833	13.00	0.204	90	0.204	90	0.015	-177	0.162	-89	0.162	90	0.000	0
0.5027	12.50	0.190	90	0.190	90	0.010	-177	0.160	-89	0.160	90	0.000	0
0.5236	12.00	0.176	90	0.176	90	0.006	-177	0.156	-89	0.156	90	0.000	0
0.5712	11.00	0.149	89	0.149	89	0.002	-176	0.147	-90	0.147	89	0.000	0
0.5984	10.50	0.136	89	0.136	89	0.001	-175	0.141	-90	0.141	89	0.000	0
0.6283	10.00	0.124	88	0.124	88	0.001	-175	0.134	-91	0.134	88	0.000	0
0.6614	9.50	0.112	88	0.112	88	0.000	0	0.127	-91	0.127	88	0.000	0
0.6981	9.00	0.100	87	0.100	87	0.000	0	0.119	-92	0.119	87	0.000	0
0.7392	8.50	0.089	86	0.089	86	0.000	0	0.110	-93	0.110	86	0.000	0
0.7854	8.00	0.078	85	0.078	85	0.000	0	0.100	-94	0.100	85	0.000	0
0.8378	7.50	0.067	83	0.067	83	0.000	0	0.089	-96	0.089	83	0.000	0
0.8976	7.00	0.056	81	0.056	81	0.000	0	0.077	-98	0.077	81	0.000	0
0.9666	6.50	0.046	79	0.046	79	0.000	0	0.065	-100	0.065	79	0.000	0

1.0472	6.00	0.035	77	0.035	77	0.000	0	0.051	-103	0.051	76	0.000	0
1.1424	5.50	0.025	75	0.025	75	0.000	0	0.038	-104	0.038	75	0.000	0
1.2566	5.00	0.017	77	0.017	77	0.000	0	0.026	-102	0.026	77	0.000	0
1.3963	4.50	0.010	84	0.010	84	0.000	0	0.016	-95	0.016	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.006	99	0.006	99	0.000	0	0.009	-80	0.009	99	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	157	0.001	157	0.000	0	0.001	-23	0.001	156	0.000	0

**LAMPIRAN G**  
**STUDI NUMERIS TERTAMBAT**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# NUMERIS TERTAMBAT

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of  
Institut Teknologi SepuluhSura

Copying of this program or use by anyone other  
than an employee of the above firm without  
written consent of Bentley Systems is strictly  
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons  
>&device -oecho no  
>&title SPAR (3DDiff By MOSES)  
>&default -depth 226.8 -spgwater 1.025  
>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.30

>&instate -condition spar 135.0264 0 0

>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Location and Net Force at Body Origin

Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
------	---	---	---	----	----	----

SPAR Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
---------------	------	------	---------	------	------	------

N Force	-0.00	0.00	-0.00	0	0	0
---------	-------	------	-------	---	---	---

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 30.00

GMT = 5.60 GML = 5.60

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full

Name	Weight	--X--	--Y--	--Z--	-----
------	--------	-------	-------	-------	-------

----- Part SPAR -----					
-----------------------	--	--	--	--	--

LOAD_GRO	27117.65	0.00	0.00	62.03	
----------	----------	------	------	-------	--

=====

Total	27117.65	0.00	0.00	62.03	
-------	----------	------	------	-------	--

Buoyancy	27117.65	-0.00	0.00	67.51	
----------	----------	-------	------	-------	--

>medit

>\*A 5.6567 5.6567 122.29

>\*B 5.6567 -5.6567 122.29

>\*C -5.6567 5.6567 122.29

>\*D -5.6567 -5.6567 122.29

>~wire b\_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 225 -b\_tension 1199.18 \

-wtplen 0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

>

>Connector IV -anc 45 126 ~wire \*A

>Connector I -anc -45 126 ~wire \*B

>Connector III -anc 135 126 ~wire \*C

>Connector II -anc -135 126 ~wire \*D

>end

>&connector @ -I\_tension 92.24

Changing Length of Connector I

=====

Changing Length of Connector II

=====

Changing Length of Connector III

=====

Changing Length of Connector IV

=====

>&picture iso

>&picture top

>CONN\_DESIGN

>TABLE I

>REPORT

>VLIST

The Variables Available for Selection are:

```
=====
1 Horizontal Distance  5 Max T/Break      9 Hor. Pull On Anchor
2 Horiz. Force At Top  6 Critical Break    10 Line On Bottom
3 DHDX                7 Critical Segment  11 Height Of 1st Conn.
4 Tension At Top      8 Vert Pull On Anchor  12 Load On 1st Conn.
```

>PLOT 1 8 -rax 6 -NO

>END

>MOVE spar -line 0 200 50

>REPORT

>VLIST

The Variables Available for Selection are:

```
=====
1 Excursion:SPAR      6 Y Restoring Force    10 Max Ratio
2 Angle               7 Res.Restoring Force  11 Min Tension
3 X Excursion         8 Max Tension          12 Min Horizontal
4 Y Excursion         9 Max Horizontal      13 Min Ratio
                    5 X Restoring Force
```

>PLOT 1 7 -NO

>END

>END

>&DCPTIME Time To End Mooring Design

Time To End Mooring Design : CP= 0.25

>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Location and Net Force at Body Origin

Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
N Force	-0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

>Hydrodynamics

>&PARAM -M\_DIST 3.5

>&picture iso -type mesh -detail

>G\_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \

15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \

4.5 4 3

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1

=====

Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640

Time to Generate 640 Panels For S : CP= 0.06

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1 : CP= 11.07

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2 : CP= 2.28

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3 : CP= 0.87

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4 : CP= 0.98

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5 : CP= 0.61

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6 : CP= 0.66

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7 : CP= 4.43

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8 : CP= 0.80

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9 : CP= 1.47

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10 : CP= 1.36

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11 : CP= 1.23

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12 : CP= 0.89

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13 : CP= 0.81

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14 : CP= 0.98

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15 : CP= 0.96

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16 : CP= 0.99

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17 : CP= 0.59

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18 : CP= 0.77

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19 : CP= 0.77

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20 : CP= 0.61

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21 : CP= 0.70

```

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22 : CP= 0.55
Setting Drift Name for SPAR to PKT1
=====
*** WARNING: Negative On Diagonal Of Damping
=====
Time To Set Up Convolution For PKT1 : CP= 0.08
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP= 0.02
>HYDR_SUM
>end_Hydrodynamics
>
>Freq_response
>rao -speed 0 -iter 500
Time To Compute RAOs : CP= 0.05
>fp_std 6.857014E-6 9.848904E-8 62.02985
>EQU_SUM
>matrices -file
>end
>exforce -file
>end
>fr_cforce I
>REPORT
>vlist
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Frequency      6 FY-Phase:I      11 MY-Amp:I
2 Period        7 FZ-Amp:I      12 MY-Phase:I
3 FX-Amp:I      8 FZ-Phase:I      13 MZ-Amp:I
4 FX-Phase:I    9 MX-Amp:I      14 MZ-Phase:I
5 FY-Amp:I      10 MX-Phase:I
>plot 1 7 -no
>end
>fr_cforce II
>REPORT
>vlist
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Frequency      6 FY-Phase:II      11 MY-Amp:II
2 Period        7 FZ-Amp:II      12 MY-Phase:II
3 FX-Amp:II     8 FZ-Phase:II      13 MZ-Amp:II
4 FX-Phase:II   9 MX-Amp:II      14 MZ-Phase:II
5 FY-Amp:II     10 MX-Phase:II
>plot 1 7 -no
>end
>fr_cforce III
>REPORT
>vlist
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Frequency      6 FY-Phase:III      11 MY-Amp:III
2 Period        7 FZ-Amp:III      12 MY-Phase:III
3 FX-Amp:III    8 FZ-Phase:III      13 MZ-Amp:III
4 FX-Phase:III  9 MX-Amp:III      14 MZ-Phase:III
5 FY-Amp:III    10 MX-Phase:III
>plot 1 7 -no
>end
>fr_cforce IV
>REPORT
>vlist
The Variables Available for Selection are:
=====
1 Frequency      6 FY-Phase:IV      11 MY-Amp:IV
2 Period        7 FZ-Amp:IV      12 MY-Phase:IV
3 FX-Amp:IV     8 FZ-Phase:IV      13 MZ-Amp:IV
4 FX-Phase:IV   9 MX-Amp:IV      14 MZ-Phase:IV
5 FY-Amp:IV     10 MX-Phase:IV
>plot 1 7 -no
>end
>
>end_freq_response
>
>&finish

```



\*\*\*\*\*

\* \*\*\* MOSES \*\*\* \*  
\* ----- July 16, 2017 \*

\* SPAR (3DDiff By MOSES) \*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters \*

\* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 \*

\*\*\*\*\*

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS+++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.834	90	0.000	0	0.091	0	0.000	0	1.013	-89	0.000	0
0.1795	35.00	0.609	90	0.000	0	0.085	0	0.000	0	0.902	-89	0.000	0
0.2094	30.00	0.380	90	0.000	0	0.075	0	0.000	0	0.851	-89	0.000	0
0.2513	25.00	0.081	90	0.000	0	0.059	0	0.000	0	0.943	-89	0.000	0
0.3142	20.00	0.739	-90	0.000	0	0.037	0	0.000	0	1.625	-90	0.000	0
0.3307	19.00	1.392	-91	0.000	0	0.032	0	0.000	0	2.415	-91	0.000	0
0.3491	18.00	5.053	-96	0.000	0	0.027	0	0.000	0	7.344	-96	0.000	0
0.3696	17.00	4.176	96	0.000	0	0.022	1	0.000	0	5.310	96	0.000	0
0.3927	16.00	1.584	93	0.000	0	0.018	1	0.000	0	1.828	93	0.000	0
0.4189	15.00	0.957	92	0.000	0	0.013	1	0.000	0	1.044	92	0.000	0
0.4333	14.50	0.804	92	0.000	0	0.011	1	0.000	0	0.858	92	0.000	0
0.4488	14.00	0.688	91	0.000	0	0.010	1	0.000	0	0.724	91	0.000	0

0.4654	13.50	0.597	91	0.000	0	0.008	1	0.000	0	0.624	91	0.000	0
0.4833	13.00	0.512	91	0.000	0	0.007	2	0.000	0	0.540	91	0.000	0
0.5027	12.50	0.451	91	0.000	0	0.005	2	0.000	0	0.477	91	0.000	0
0.5236	12.00	0.398	91	0.000	0	0.004	2	0.000	0	0.425	91	0.000	0
0.5712	11.00	0.303	91	0.000	0	0.002	3	0.000	0	0.341	91	0.000	0
0.5984	10.50	0.268	90	0.000	0	0.002	4	0.000	0	0.308	90	0.000	0
0.6283	10.00	0.236	90	0.000	0	0.001	4	0.000	0	0.278	90	0.000	0
0.6614	9.50	0.207	89	0.000	0	0.001	5	0.000	0	0.250	89	0.000	0
0.6981	9.00	0.181	89	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.224	89	0.000	0
0.7392	8.50	0.156	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.200	88	0.000	0
0.7854	8.00	0.134	86	0.000	0	0.013	-170	0.000	0	0.176	86	0.000	0
0.8378	7.50	0.113	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.153	85	0.000	0
0.8976	7.00	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.130	83	0.000	0
0.9666	6.50	0.075	80	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.106	80	0.000	0
1.0472	6.00	0.057	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.083	78	0.000	0
1.1424	5.50	0.041	76	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.060	76	0.000	0
1.2566	5.00	0.027	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.041	78	0.000	0
1.3963	4.50	0.016	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.025	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.009	98	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.014	98	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	155	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.002	154	0.000	0

Page 12 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

\*

\*\*\* MOSES \*\*\*

\*

\*

-----

July 16, 2017

\*

\*

SPAR (3DDiff By MOSES)

\*

\* Draft

= 135.0 Meters

Trim Angle

= 0.00 Deg.

\*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters

Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters

Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters \*

\* Heading

= 22.50 Deg.

Forward Speed = 0.00 Knots

Linearization Based on 1/ 20 \*

\*\*\*\*\*

# +++ MOTION RESPONSE OPERATORS+++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.771	90	0.319	90	0.091	0	0.388	90	0.936	-89	0.000	0
0.1795	35.00	0.563	90	0.233	90	0.085	0	0.345	90	0.833	-89	0.000	0
0.2094	30.00	0.351	90	0.146	90	0.075	0	0.326	90	0.786	-89	0.000	0
0.2513	25.00	0.075	90	0.031	90	0.059	0	0.361	90	0.871	-89	0.000	0
0.3142	20.00	0.683	-90	0.283	-90	0.037	0	0.622	89	1.501	-90	0.000	0
0.3307	19.00	1.286	-91	0.533	-91	0.032	0	0.924	88	2.232	-91	0.000	0
0.3491	18.00	4.668	-96	1.931	-96	0.027	0	2.807	83	6.785	-96	0.000	0
0.3696	17.00	3.858	96	1.597	96	0.022	1	2.031	-83	4.906	96	0.000	0
0.3927	16.00	1.464	93	0.606	93	0.018	1	0.700	-86	1.689	93	0.000	0
0.4189	15.00	0.884	92	0.366	92	0.013	1	0.400	-87	0.965	92	0.000	0
0.4333	14.50	0.743	92	0.308	92	0.011	1	0.329	-87	0.793	92	0.000	0
0.4488	14.00	0.636	91	0.263	91	0.010	1	0.277	-88	0.669	91	0.000	0
0.4654	13.50	0.551	91	0.228	91	0.008	1	0.239	-88	0.576	91	0.000	0
0.4833	13.00	0.473	91	0.196	91	0.007	2	0.207	-88	0.499	91	0.000	0
0.5027	12.50	0.417	91	0.173	91	0.005	2	0.183	-88	0.441	91	0.000	0
0.5236	12.00	0.368	91	0.152	91	0.004	2	0.163	-88	0.393	91	0.000	0
0.5712	11.00	0.280	91	0.116	91	0.002	3	0.130	-88	0.315	91	0.000	0
0.5984	10.50	0.248	90	0.103	90	0.002	4	0.118	-89	0.284	90	0.000	0
0.6283	10.00	0.218	90	0.090	90	0.001	4	0.106	-89	0.256	90	0.000	0
0.6614	9.50	0.191	89	0.079	89	0.001	5	0.096	-90	0.231	89	0.000	0

```

Page 13 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11
*****
*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     -----                                     *
*                                     July 16, 2017                                     *
*                                     SPAR (3DDiff By MOSES)                                     *
* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. *
* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *
*****

```

```

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS+++
=====
Results are in Body System
Of Point On Body SPAR At X =  0.0 Y =  0.0 Z = 62.0
Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified
ENCOUNTER Surge / Sway / Heave / Roll / Pitch / Yaw /
----- Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl. Wave Ampl.
Frequency Period /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/

```

-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.590	90	0.590	90	0.091	0	0.716	90	0.716	-89	0.000	0
0.1795	35.00	0.431	90	0.431	90	0.085	0	0.638	90	0.638	-89	0.000	0
0.2094	30.00	0.269	90	0.269	90	0.075	0	0.602	90	0.602	-89	0.000	0
0.2513	25.00	0.057	90	0.057	90	0.059	0	0.667	90	0.667	-89	0.000	0
0.3142	20.00	0.523	-90	0.523	-90	0.037	0	1.149	89	1.149	-90	0.000	0
0.3307	19.00	0.985	-91	0.985	-91	0.032	0	1.708	88	1.708	-91	0.000	0
0.3491	18.00	3.573	-96	3.569	-96	0.027	0	5.187	83	5.193	-96	0.000	0
0.3696	17.00	2.953	96	2.950	96	0.022	1	3.752	-82	3.755	96	0.000	0
0.3927	16.00	1.120	93	1.120	93	0.018	1	1.293	-86	1.293	93	0.000	0
0.4189	15.00	0.677	92	0.677	92	0.013	1	0.738	-87	0.738	92	0.000	0
0.4333	14.50	0.568	92	0.568	92	0.011	1	0.607	-87	0.607	92	0.000	0
0.4488	14.00	0.486	91	0.486	91	0.010	1	0.512	-88	0.512	91	0.000	0
0.4654	13.50	0.422	91	0.422	91	0.008	1	0.441	-88	0.441	91	0.000	0
0.4833	13.00	0.362	91	0.362	91	0.007	2	0.382	-88	0.382	91	0.000	0
0.5027	12.50	0.319	91	0.319	91	0.005	2	0.338	-88	0.338	91	0.000	0
0.5236	12.00	0.281	91	0.281	91	0.004	2	0.301	-88	0.301	91	0.000	0
0.5712	11.00	0.215	91	0.215	91	0.002	3	0.241	-88	0.241	91	0.000	0
0.5984	10.50	0.190	90	0.190	90	0.002	4	0.217	-89	0.217	90	0.000	0
0.6283	10.00	0.167	90	0.167	90	0.001	4	0.196	-89	0.196	90	0.000	0
0.6614	9.50	0.146	89	0.146	89	0.001	5	0.177	-90	0.177	89	0.000	0
0.6981	9.00	0.128	89	0.128	89	0.000	0	0.158	-90	0.158	89	0.000	0
0.7392	8.50	0.111	88	0.111	88	0.000	0	0.141	-91	0.141	88	0.000	0
0.7854	8.00	0.095	86	0.095	86	0.013	-170	0.124	-93	0.124	86	0.000	0
0.8378	7.50	0.080	85	0.080	85	0.000	0	0.108	-94	0.108	85	0.000	0
0.8976	7.00	0.066	83	0.066	83	0.000	0	0.092	-96	0.092	83	0.000	0
0.9666	6.50	0.053	80	0.053	80	0.000	0	0.075	-99	0.075	80	0.000	0
1.0472	6.00	0.040	78	0.040	78	0.000	0	0.059	-101	0.059	78	0.000	0
1.1424	5.50	0.029	76	0.029	76	0.000	0	0.043	-103	0.043	76	0.000	0

1.2566	5.00	0.019	78	0.019	78	0.000	0	0.029	-101	0.029	78	0.000	0
1.3963	4.50	0.011	84	0.011	84	0.000	0	0.018	-95	0.018	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.006	98	0.006	98	0.000	0	0.010	-81	0.010	98	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	155	0.001	155	0.000	0	0.001	-25	0.001	154	0.000	0

Page 14 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

```

*                               *** MOSES ***                               *
*                               ----- July 16, 2017                        *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                           *
* Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                  *
* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
* Heading      = 0.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *

```

\*\*\*\*\*

# +++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element I

ENCOUNTER		FX /	FY /	FZ /	MX /	MY /	MZ /
Wave Ampl.		Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.
Frequency	Period	/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/					
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	90	52.62	48
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	90	47.72	46
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	90	43.65	48
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	90	42.95	57
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	89	64.23	76
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	88	93.85	81
0.3491	18.00	904.42	-96	899.84	83	282.86	81
0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	204.45	-80

0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.59	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.42	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.23	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	28.01	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.83	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.37	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.34	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.05	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.76	-86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.61	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.55	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.56	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.62	-90	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	9.18	-124	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.86	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.07	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.95	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	-24	0.07	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 20 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

*	*** MOSES ***	*
*	-----	*
*	SPAR (3DDiff By MOSES)	*
	July 16, 2017	*
		*





0.5712	11.00	25.45	91	25.14	-88	7.08	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	22.74	90	22.47	-89	6.37	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	20.30	90	20.05	-89	5.74	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	18.07	89	17.85	-90	5.16	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	16.00	89	15.81	-90	4.63	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	14.08	88	13.91	-91	4.12	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	12.27	86	12.12	-93	6.74	-138	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	10.54	85	10.41	-94	3.17	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	8.84	83	8.74	-96	2.69	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	7.18	80	7.09	-99	2.21	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	5.54	78	5.48	-101	1.72	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	4.01	76	3.96	-103	1.25	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	2.67	78	2.64	-101	0.84	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	1.63	84	1.61	-95	0.52	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	0.90	98	0.89	-81	0.29	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.11	155	0.11	-24	0.04	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 21 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     ----- July 16, 2017 *
*      SPAR (3DDiff By MOSES) *
*   Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg. *
*   Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*   Heading      = 45.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *

```

\*\*\*\*\*

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified  
For The Element I

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.06	-71	0.06	-108	35.50	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	0.09	-79	0.09	-99	32.86	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	0.13	-83	0.13	-95	28.95	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	0.23	-84	0.23	-94	23.01	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	0.63	-79	0.63	-101	14.43	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	1.09	-69	1.07	-113	12.40	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	7.11	-40	6.43	-163	8.90	3	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	4.42	47	3.96	155	7.60	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	0.91	82	0.89	103	6.80	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	0.52	89	0.52	95	5.19	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	0.43	90	0.43	94	4.44	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	0.37	90	0.37	93	3.75	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	0.32	90	0.32	92	3.11	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	0.27	90	0.27	92	2.53	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	0.24	91	0.24	92	2.01	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	0.21	91	0.21	91	1.56	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	0.17	90	0.17	91	0.85	3	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	0.15	90	0.15	90	0.60	4	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	0.13	90	0.13	90	0.41	4	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	0.12	89	0.12	90	0.27	5	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	0.11	89	0.11	89	0.18	6	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	0.09	88	0.09	88	0.14	8	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	0.08	86	0.08	87	4.92	-170	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.8378	7.50	0.07	85	0.07	85	0.01	-168	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	0.06	83	0.06	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	0.05	80	0.05	80	0.00	23	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	0.04	78	0.04	78	0.00	27	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	0.03	76	0.03	76	0.00	33	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	0.02	78	0.02	78	0.00	43	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	0.01	84	0.01	84	0.00	58	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	0.01	98	0.01	98	0.00	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.00	155	0.00	155	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 22 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

```

*****
*                                     *
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     ----- July 16, 2017                      *
*                                     *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                           *
*      * Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.              *
*      * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*      * Heading      = 0.00 Deg.    Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*****

```

# +++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element II

E N C O U N T E R		F X /		F Y /		F Z /		M X /		M Y /		M Z /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	-89	52.56	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	-89	47.64	-45	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	-89	43.53	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	-89	42.73	-57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	-90	63.60	-77	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	-91	92.90	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	904.42	-96	899.85	-96	280.18	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.45	96	202.77	94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.02	93	70.15	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	92	40.27	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	92	33.15	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	91	27.98	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	91	24.09	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	91	20.86	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	91	18.43	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	91	16.40	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	91	13.12	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	90	11.83	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	90	10.67	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	89	9.60	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	89	8.61	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	88	7.67	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	86	7.41	127	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	85	5.85	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	83	4.97	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.08	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.96	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	155	0.07	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     ----- July 16, 2017 *
*
*   SPAR (3DDiff By MOSES) *
*   Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg. *
*   Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*   Heading      = 22.50 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *

```

\*\*\*\*\*

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element II

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-												
0.1571	40.00	21.33	-89	21.28	-89	61.86	-54	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	31.32	-89	31.25	-89	55.79	-53	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	47.51	-89	47.41	-89	51.42	-55	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	84.11	-89	83.93	-89	52.40	-63	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	226.12	-90	225.65	-90	82.30	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	363.21	-91	362.45	-91	121.06	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	1179.54	-96	1177.06	-96	366.22	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	901.29	96	899.40	96	265.04	94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	323.90	93	323.22	93	91.54	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	189.85	92	189.45	92	52.45	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	157.62	92	157.29	92	43.16	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	133.87	91	133.59	91	36.42	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.4654	13.50	115.69	91	115.44	91	31.37	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	99.74	91	99.53	91	27.17	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	88.01	91	87.82	91	24.01	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	78.07	91	77.90	91	21.38	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	61.12	91	60.99	91	17.12	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	54.63	90	54.52	90	15.44	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	48.76	90	48.66	90	13.93	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	43.39	89	43.30	89	12.54	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	38.44	89	38.36	89	11.24	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	33.83	88	33.76	88	10.02	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	29.48	86	29.42	86	9.09	118	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	25.31	85	25.25	85	7.65	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	21.24	83	21.20	83	6.49	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	17.24	80	17.20	80	5.32	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	13.32	78	13.29	78	4.15	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	9.62	76	9.60	76	3.03	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	6.41	78	6.40	78	2.03	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	3.90	84	3.90	84	1.25	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	2.16	98	2.15	98	0.70	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.26	155	0.26	155	0.09	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 24 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

\*

\*\*\* MOSES \*\*\*

\*

\*

-----

July 16, 2017

\*

\*

SPAR (3DDiff By MOSES)

\*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg.

\*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters \*

\* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 \*

\*\*\*\*\*

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element II

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	23.06	-89	23.06	-89	65.33	-56	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	33.86	-89	33.86	-89	58.84	-55	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	51.37	-89	51.37	-89	54.36	-57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	90.95	-89	90.95	-89	55.92	-65	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	244.50	-90	244.50	-90	88.90	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	392.72	-91	392.72	-91	130.97	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	1275.08	-96	1275.08	-96	396.37	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	974.29	96	974.28	96	286.83	95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	350.21	93	350.21	93	99.06	89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	205.28	92	205.28	92	56.74	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	170.43	92	170.43	92	46.68	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	144.75	91	144.75	91	39.39	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	125.09	91	125.09	91	33.93	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	107.85	91	107.85	91	29.39	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	95.16	91	95.16	91	25.97	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	84.41	91	84.41	91	23.13	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	66.09	91	66.09	91	18.52	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	59.07	90	59.07	90	16.71	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	52.72	90	52.72	90	15.07	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	46.92	89	46.92	89	13.57	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0





0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	90	52.56	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	90	47.64	-45	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	90	43.53	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	90	42.73	-57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	89	63.60	-77	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	88	92.90	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	904.42	-96	899.84	83	280.17	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	202.77	94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.15	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.27	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.15	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	27.98	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.86	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.43	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.40	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.12	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.83	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.67	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.60	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.61	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.67	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	7.41	127	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.85	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.08	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0

1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.96	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	-24	0.07	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 26 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

```

*                               *** MOSES ***                               *
*                               ----- July 16, 2017                       *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                           *
*  Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                  *
*  Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*  Heading      = 22.50 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *

```

\*\*\*\*\*

### +++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element III

ENCOUNTER		FX /	FY /	FZ /	MX /	MY /	MZ /
Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.
Frequency	Period	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-						
0.1571	40.00	8.88 -89	8.77 90	41.22 -30	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.1795	35.00	13.04 -89	12.88 90	37.78 -29	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.2094	30.00	19.78 -89	19.54 90	33.85 -30	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.2513	25.00	35.02 -89	34.59 90	30.11 -39	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.3142	20.00	94.14 -90	92.99 89	36.37 -67	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.3307	19.00	151.22 -91	149.37 88	51.16 -77	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.3491	18.00	491.63 -95	485.65 84	151.46 -92	0.00 0	0.00 0	0.00 0
0.3696	17.00	375.42 96	370.85 -83	109.67 91	0.00 0	0.00 0	0.00 0

0.3927	16.00	134.85	93	133.21	-86	38.30	82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	79.04	92	78.07	-87	22.19	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	65.62	92	64.82	-87	18.31	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	55.73	91	55.05	-88	15.46	77	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	48.16	91	47.58	-88	13.30	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	41.52	91	41.02	-88	11.50	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	36.64	91	36.19	-88	10.13	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	32.50	91	32.10	-88	8.99	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	25.45	91	25.14	-88	7.15	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	22.74	90	22.47	-89	6.44	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	20.30	90	20.05	-89	5.80	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	18.07	89	17.85	-90	5.21	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	16.00	89	15.81	-90	4.67	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	14.08	88	13.91	-91	4.17	86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	12.27	86	12.12	-93	5.43	148	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	10.54	85	10.41	-94	3.17	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	8.84	83	8.74	-96	2.69	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	7.18	80	7.09	-99	2.21	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	5.54	78	5.48	-101	1.72	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	4.01	76	3.96	-103	1.25	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	2.67	78	2.64	-101	0.84	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	1.63	84	1.61	-95	0.52	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	0.90	98	0.89	-81	0.29	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.11	155	0.11	-24	0.04	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0

\*\*\*\*\*

*	*** MOSES ***	*
*	-----	*
*	SPAR (3DDiff By MOSES)	*
	July 16, 2017	*

\* Draft = 135.0 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. \*

\* Roll Gy. Radius = 61.5 Meters Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters \*

\* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 \*

\*\*\*\*\*

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element III

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.06	-71	0.06	-108	35.48	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	0.09	-79	0.09	-99	32.85	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	0.13	-83	0.13	-95	28.94	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	0.23	-84	0.23	-94	23.02	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	0.63	-79	0.63	-101	14.48	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	1.09	-69	1.07	-113	12.61	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	7.11	-40	6.43	-163	12.24	-1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	4.42	47	3.96	155	9.72	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	0.91	82	0.89	103	6.91	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	0.52	89	0.52	95	5.21	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	0.43	90	0.43	94	4.45	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	0.37	90	0.37	93	3.75	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	0.32	90	0.32	92	3.11	1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	0.27	90	0.27	92	2.53	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	0.24	91	0.24	92	2.01	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	0.21	91	0.21	91	1.57	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	0.17	90	0.17	91	0.85	3	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.5984	10.50	0.15	90	0.15	90	0.60	4	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	0.13	90	0.13	90	0.41	4	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	0.12	89	0.12	90	0.27	5	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	0.11	89	0.11	89	0.18	6	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	0.09	88	0.09	88	0.14	8	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	0.08	86	0.08	87	4.92	-170	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	0.07	85	0.07	85	0.01	-168	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	0.06	83	0.06	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	0.05	80	0.05	80	0.00	22	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	0.04	78	0.04	78	0.00	26	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	0.03	76	0.03	76	0.00	33	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	0.02	78	0.02	78	0.00	43	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	0.01	84	0.01	84	0.00	58	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	0.01	98	0.01	98	0.00	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.00	155	0.00	155	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 28 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     -----                                     *
*                                     July 16, 2017                                     *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                     *
*   Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                                     *
*   Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*   Heading      = 0.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20   *

```

\*\*\*\*\*

# +++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element IV

ENCOUNTER	FX /	FY /	FZ /	MX /	MY /	MZ /
-----------	------	------	------	------	------	------

-----	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.	Wave Ampl.
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.1571	40.00	16.35 -89	16.26 -89	52.62 48	0.00 0	0.00 0
0.1795	35.00	24.01 -89	23.88 -89	47.72 46	0.00 0	0.00 0
0.2094	30.00	36.41 -89	36.23 -89	43.65 48	0.00 0	0.00 0
0.2513	25.00	64.47 -89	64.14 -89	42.95 57	0.00 0	0.00 0
0.3142	20.00	173.33 -90	172.45 -90	64.23 76	0.00 0	0.00 0
0.3307	19.00	278.41 -91	277.00 -91	93.85 81	0.00 0	0.00 0
0.3491	18.00	904.42 -96	899.85 -96	282.87 81	0.00 0	0.00 0
0.3696	17.00	690.95 96	687.45 96	204.45 -80	0.00 0	0.00 0
0.3927	16.00	248.27 93	247.02 93	70.59 -81	0.00 0	0.00 0
0.4189	15.00	145.52 92	144.78 92	40.42 -80	0.00 0	0.00 0
0.4333	14.50	120.82 92	120.21 92	33.23 -80	0.00 0	0.00 0
0.4488	14.00	102.61 91	102.09 91	28.01 -80	0.00 0	0.00 0
0.4654	13.50	88.67 91	88.23 91	24.09 -80	0.00 0	0.00 0
0.4833	13.00	76.45 91	76.06 91	20.83 -81	0.00 0	0.00 0
0.5027	12.50	67.46 91	67.12 91	18.37 -82	0.00 0	0.00 0
0.5236	12.00	59.84 91	59.53 91	16.34 -83	0.00 0	0.00 0
0.5712	11.00	46.85 91	46.61 91	13.05 -85	0.00 0	0.00 0
0.5984	10.50	41.88 90	41.66 90	11.76 -86	0.00 0	0.00 0
0.6283	10.00	37.37 90	37.18 90	10.61 -87	0.00 0	0.00 0
0.6614	9.50	33.26 89	33.09 89	9.55 -88	0.00 0	0.00 0
0.6981	9.00	29.47 89	29.32 89	8.56 -89	0.00 0	0.00 0
0.7392	8.50	25.93 88	25.80 88	7.62 -90	0.00 0	0.00 0
0.7854	8.00	22.59 86	22.48 86	9.18 -124	0.00 0	0.00 0
0.8378	7.50	19.40 85	19.30 85	5.86 -94	0.00 0	0.00 0
0.8976	7.00	16.28 83	16.20 83	4.97 -96	0.00 0	0.00 0

0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.07	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.95	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	155	0.07	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

Page 29 Licensee - Institut Teknologi SepuluhSura Rev 07.10.01.11

\*\*\*\*\*

```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     ----- July 16, 2017 -----*
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                         *
*      Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.          *
*      Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*      Heading      = 22.50 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *

```

\*\*\*\*\*

### +++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element IV

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-												
0.1571	40.00	21.33	-89	21.28	-89	61.92	55	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	31.32	-89	31.25	-89	55.88	54	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	47.51	-89	47.41	-89	51.56	56	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	84.11	-89	83.93	-89	52.64	64	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	226.12	-90	225.65	-90	82.93	79	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.3307	19.00	363.21	-91	362.45	-91	122.02	82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	1179.54	-96	1177.06	-96	368.97	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	901.29	96	899.40	96	266.74	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	323.90	93	323.22	93	91.99	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	189.85	92	189.45	92	52.61	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	157.62	92	157.29	92	43.24	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	133.87	91	133.59	91	36.45	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	115.69	91	115.44	91	31.36	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	99.74	91	99.53	91	27.13	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	88.01	91	87.82	91	23.95	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	78.07	91	77.90	91	21.32	-84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	61.12	91	60.99	91	17.04	-86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	54.63	90	54.52	90	15.37	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	48.76	90	48.66	90	13.86	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	43.39	89	43.30	89	12.48	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	38.44	89	38.36	89	11.19	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	33.83	88	33.76	88	9.97	-90	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	29.48	86	29.42	86	11.00	-118	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	25.31	85	25.25	85	7.65	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	21.24	83	21.20	83	6.49	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	17.24	80	17.20	80	5.32	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	13.32	78	13.29	78	4.15	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	9.62	76	9.60	76	3.03	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	6.41	78	6.40	78	2.03	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	3.90	84	3.90	84	1.25	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	2.16	98	2.15	98	0.69	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.26	155	0.26	155	0.09	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0



```

*                                     *** MOSES ***                                     *
*                                     ----- July 16, 2017 -----*
*      SPAR (3DDiff By MOSES)      *
*      * Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.      *
*      * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*      * Heading      = 45.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*****

```

+++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element IV

ENCOUNTER			FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /		
Wave Ampl.			Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	23.06	-89	23.06	-89	65.38	57	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	33.86	-89	33.86	-89	58.92	56	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	51.37	-89	51.37	-89	54.50	58	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	90.95	-89	90.95	-89	56.16	66	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	244.50	-90	244.50	-90	89.54	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	392.72	-91	392.72	-91	131.94	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	1275.08	-96	1275.08	-96	399.16	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	974.29	96	974.28	96	288.57	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	350.21	93	350.21	93	99.51	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	205.28	92	205.28	92	56.89	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	170.43	92	170.43	92	46.76	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	144.75	91	144.75	91	39.43	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	125.09	91	125.09	91	33.92	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	107.85	91	107.85	91	29.35	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.5027	12.50	95.16	91	95.16	91	25.92	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	84.41	91	84.41	91	23.07	-84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	66.09	91	66.09	91	18.45	-86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	59.07	90	59.07	90	16.64	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	52.72	90	52.72	90	15.01	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	46.92	89	46.92	89	13.51	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	41.57	89	41.57	89	12.12	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	36.58	88	36.58	88	10.79	-90	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	31.87	86	31.87	86	11.66	-117	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	27.36	85	27.36	85	8.29	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	22.97	83	22.97	83	7.03	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	18.64	80	18.64	80	5.76	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	14.40	78	14.40	78	4.49	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	10.40	76	10.40	76	3.28	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	6.93	78	6.93	78	2.20	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	4.22	84	4.22	84	1.35	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	2.33	98	2.33	98	0.75	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.28	155	0.28	155	0.09	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Ivandito Herdayanditya merupakan putra pertama dari Heri Saptono W. dan Handayani yang lahir di Surakarta pada 20 September 1995. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Kristen Petra 13 Sidoarjo, SMP Kristen Petra 5 Surabaya dan SMAN 5 Surabaya. Setelah lulus SMA pada tahun 2013, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik dan organisasi. Pada tahun 2014 dan 2015 penulis meraih medali perunggu bidang fisika di Olimpiade Nasional Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (ONMIPA). Penulis juga memiliki pengalaman berorganisasi di SPE ITS dan HIMATEKLA FTK ITS. Di SPE, penulis dipercaya menjadi Kepala Divisi Pelatihan periode 2014/ 2015 sedangkan di HIMATEKLA FTK ITS penulis menjadi staff di Departemen Kajian Strategis periode 2014/ 2015 dan Ketua Divisi Pelatihan Departemen Keprofesian periode 2015/ 2016. Bersama beberapa teman, pada 2015 penulis mendirikan *Oil Rig Club*. Pada 2016, penulis mengadakan *Floating Structure Competition* pertama di OCEANO 5. Penulis juga aktif dalam beberapa kepanitian kampus. Pada tahun 2016, penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktek di PT. PAL Indonesia selama dua bulan. Karena prestasi akademik dan non-akademik pada tahun 2016 penulis mendapat penghargaan sebagai Juara 1 Class NK Award. Di tahun akhir penulis menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS sekaligus mengerjakan Tugas Akhir dengan tema gerakan dan tegangan tali tambat SPAR.

Email : Ivanditoherdayanditya@gmail.com